中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 1 期: 93 ~ 114
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com







评 述 中国综合地层和时间框架专辑

# 中国志留纪综合地层和时间框架

戎嘉余[1,2*], 王怿[1,2†], 詹仁斌[1,2,3], 樊隽轩[1,2], 黄冰[1,2], 唐鹏[1,2], 李越[1,2], 张小乐[4], 吴荣昌[2], 王光旭[1,2], 魏鑫[1,5]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院生物演化与环境卓越创新中心, 南京 210008;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
5. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026
* 通讯作者, E-mail: jyrong@nigpas.ac.cn
† 通讯作者, E-mail: yiwang@nigpas.ac.cn

收稿日期: 2017-09-27; 收修改稿日期: 2018-06-26; 接受日期: 2018-07-26; 网络版发表日期: 2018-10-22
中国科学院战略性先导科技专项B类项目(编号: XDB26000000)和国家自然科学基金项目(批准号: 41530103, 41521061, 41290260)资助

**摘要** 志留纪是显生宙内, 除第四纪和新近纪外, 历程最短的一个纪, 是奥陶纪大灭绝后生物多样性快速复苏、板块聚合、大洋消失或变窄、气候和海平面多变、生物地理区系弱化和植物开始占据陆地的一个重要而特殊的时期. 志留系又是第一个建立全球年代地层标准(四统、七阶)的系, 但在20世纪80年代中期开展的"后层型"研究后发现, 一些阶的底界层型, 由于定义不精准和/或层型剖面的先天缺陷、关键标准化石始终未曾发现等, 精时对比受到制约. 本文剖析中国志留系发育特点, 综述近些年来在生物地层、年代地层、事件地层(如沉积相分异, 黑色页岩、海相红层和碳酸盐岩与生物礁的时空分异)、化学地层、构造地层(如华南志留纪晚期地层的广布及其构造意义)等方面取得的主要研究进展, 指出目前存在的和今后需重点关注的问题. 年代地层学研究不宜只集中在一条界线上, 需注重界线上下的生物、化学、磁性、环境、年龄等多领域的综合交叉, 提高层型的优质度, 延伸在区域和全球的对比价值. 期盼我国志留系研究在兰多维列统生态地层、盆地分析及综合地层的精时对比, 温洛克世至普里道利世年代地层框架的确立和对比, 化学和磁性地层研究及关键层段绝对年龄的测定, 古地理与大地构造研究的深化, 陆地生态系统早期演化等方面取得重要成果, 并在个别统、阶的底界层型的再研究中发挥重要作用.

**关键词** 志留纪, 生物地层, 年代地层, 化学地层, 深水黑色页岩, 浅水海相红层, 古地理, 沉积间断

## 1 引言

志留纪是显生宙里除第四纪和新近纪外历程最短的一个纪(约25Ma). 尽管历程不长, 所涵盖的地质内容却较丰富且关键, 因为这是奥陶纪大灭绝后生物多样性快速上升, 大陆板块聚合、大洋消失或变窄, 气候

中文引用格式: 戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 樊隽轩, 黄冰, 唐鹏, 李越, 张小乐, 吴荣昌, 王光旭, 魏鑫. 2019. 中国志留纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 93–114, doi: 10.1360/N072017-00325
英文引用格式: Rong J Y, Wang Y, Zhan R B, Fan J X, Huang B, Tang P, Li Y, Zhang X L, Wu R C, Wang G X, Wei X. 2019. Silurian integrative stratigraphy and timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 89–111, https://doi.org/10.1007/s11430-017-9258-0

变化和海平面升降频繁, 海洋生物地理区系弱化和植被占据陆地的一个非常特殊的地质时期.

中国学者开始研究志留系已有近百年的历史(Lee和Chao, 1924). 前辈们较早地为华南志留系的划分建立了序列, 与国际对比亦基本到位(Grabau, 1924; 谢家荣和赵亚曾, 1925a, 1925b; Ting和Wang, 1937). 后来, 由于化石鉴定未及精准而误以为华南志留系三统齐全(Sun, 1943), 国际对比出现了问题. 经典地区的志留系发育不全, 也制约了相关研究(Yin, 1949, 1966; 穆恩之, 1964). 随着全国区域地质填图的开展, 扬子区的研究不断深化, 东北(内蒙古、黑龙江和吉林)、西北(新疆、甘肃和宁夏)、西藏(如拉萨、喀喇昆仑)、西南(滇西、滇南)等地区的研究加强, 坚持与国际标准接轨, 地层划分和对比的精度得到较大的提升, 使中国志留系研究踏上了一个新的台阶(如汪啸风, 1965; 葛治洲等, 1979; 林宝玉, 1979; 穆恩之等, 1982; 林宝玉等, 1984, 1998; Mu等, 1986; 汪啸风等, 1987; 陈旭和戎嘉余, 1996; Rong和Chen, 2003).

我国志留系的发育有如下主要特点: (1) 地层完整性和连续性欠缺, 如经典地区华南. (2) 各统发育程度和分布状况不平衡; 扬子区主要发育兰多维列统, 划分对比意见分歧和变动大, 为其他各系所罕见; 温洛克统到普里道利统主要见于钦防地区、西秦岭、西藏、南天山、滇西、滇南、大兴安岭、小兴安岭和华北地台边缘, 但剖面分散, 化石层不连续, 总体研究还有较大的提升空间. (3) 地层平均厚度大, 华南从近千米(黔北)到约4500m(浙西), 远厚于奥陶系; 西藏的最薄, 不足200m. (4) 化石的丰度明显不如奥陶纪和泥盆纪的, 巨厚的碎屑岩地层中化石很少或单一, 岩石地层的组间界线不易划定. (5) 不同相区的地层, 分布于不同的古地理位置, 缺少关键化石, 难以进行横向对比; 区域构造活动频繁, 陆源碎屑物质供应充足, 富氧、碎屑沉积相(如海相红层)广布, 台地灰岩相和生物礁相局地发育(如滇西、西藏和部分扬子区). (6) 在海洋生物常见类群中, 腕足类广布, 三叶虫次之, 笔石、牙形类、几丁虫、珊瑚、鱼类等时有发育, 局部富集.

中国志留系研究, 近年来取得了如下主要进展: (1) 华南志留系研究的深化, 使兰多维列统的对比精度大幅提高, 鲁丹阶和埃隆阶的笔石分带研究取得新认识, 牙形类的新证据使秀山组上部对比不断下压(王成源等, 2010); 川、滇、内蒙古的志留系研究取得新进展. (2) 志留纪晚期地层研究有新的突破, 扬子区广大范围内新识别出以罗德洛统上部为主的小溪组(王怿等, 2011), 并与车家坝组(金淳泰等, 1992, 1997)部分对比; 鄂西宜昌纱帽山上首次识别出小溪组, 改变了近百年的传统认识(王怿等, 2018). (3) 综合性、多元化研究开始, 化学地层研究取得初步成果, 四川盐边温洛克统中识别出2次可与国际对比的碳同位素正漂事件(王怿等, 2016). (4) 志留系一“黑”(黑色笔石页岩)、一“红”(近岸浅水海相红层)沉积备受关注, 前者的划分对比更为精深, 在页岩气勘探和开发中发挥重要作用(陈旭等, 2015; 邹才能等, 2015); 后者的时空分布和源头分析有新的认识(戎嘉余等, 2012; Zhang等, 2014). (5) 志留纪一批重要生物群的发现为揭示生物宏观演化特征和地层划分对比提供重要证据, 如志留纪初期的海洋浅水和深水底栖生物群(腕足类、珊瑚和海绵)(Rong等, 2013; Li等, 2015; Wang等, 2017; Botting等, 2017)、志留纪晚期浅海相的鱼类(及其微体)动物群(Zhu等, 2013, 2016)和志留纪鱼类序列(赵文金和朱敏, 2014). (6) 随着华南志留系对比精度的提高, 为广西运动特征、时空变化、节律分布(陈旭等, 2012, 2014)及对志留纪各时期岩相古地理的恢复(Rong等, 2003)提出了新的认识.

现就全球标准及其存在问题、我国志留纪生物与年代地层问题、各块体志留系发育总体特征、沉积相的分异及其环境背景、华南志留纪晚期地层的识别标志、地层中假整合的多发及其构造意义、化学地层及环境初探等方面, 简述如下.

## 2 全球志留纪年代地层学的标准及其问题

志留系是第一个确立年代地层标准的系. 20世纪80年代, 国际志留系分会提交四统、七阶划分方案, 从下至上, 四统是指兰多维列统(Llandovery Series)、温洛克统(Wenlock)、罗德洛统(Ludlow)和普里道利统(Pridoli); 七阶分别为兰多维列统的鲁丹阶(Rhuddanian Stage)、埃隆阶(Aeronian)和特列奇阶(Telychian), 温洛克统的申伍德阶(Sheinwoodian)和侯墨阶(Homerian), 罗德洛统的戈斯特阶(Gorstian)和卢德福特阶(Ludfordian), 普里道利统未分阶(Holland, 1985; Cocks, 1985)(图1). 此方案在国际地层委员会批准后, 成为全球志留系划分对比的统一标准(Holland 和 Bassett,

1989). 在一个系内, 统一年代地层框架(底界界线层型剖面和点位, 即GSSP, 俗称金钉子)是当时地层学界普遍赞同使用的理念, 旨在更便捷地进行精时地层划分对比, 在探讨科学问题中有统一标准和共同语言, 而不是消耗在无休止的争论之中.

除普里道利统外, 志留纪年代地层框架均构建在英国传统的岩石地层序列上, 当时并未充分意识到广泛对比潜力的重要性, 故存在以下问题: (1) 主导门类是笔石, 但层型剖面上以壳相化石为主, 笔石带序列不发育或不连续; (2) 关键层位缺失确凿的关键化石(除志留系底界外); (3) 层型与点位的研究程度明显不足, 关键化石类群的系统分类学研究尚存诸多争议; (4) 部分层型剖面出露不理想甚至很难被发现(如温洛克统底界等). 下面列举3例予以说明.

(1) 志留系底界层型. 位于苏格兰南部道布斯林(Dob′s Linn)剖面的博克山页岩组(Birkhill Shale Formation)的底界之上1.6m处, 即*Parakidograptus acuminatus*带之底(Williams, 1988); 在确定它的GSSP的投票中, 赞成票只占66%(Cocks, 1985). 由于当时该层型不能满足建立金钉子的诸项条件, 其权威性争议持续不断. 嗣后不久, 一些选举委员便公开撰文表示反对(Lespérance 等, 1987; Berry, 1987). 然而, 毕竟赞成票已达三分之二, 符合国际地层委员会的规程, 该层型被铁板钉钉. 直到21世纪初, 因系统古生物、生物地层等方面获得新的突破, 对它的再研究才开始启动.

(2) 温洛克统底界层型. 位于英格兰西部的该层型剖面有严重缺陷, 虽说确定以*Cyrtograptus centrifugus*带为该统底部的标准笔石带, 但该带化石却从未在这个层型剖面上找到过. 更有甚者, 此界线被划在两个岩石地层单位Purple Shales 组(下)和Buildwas 组(上)之间; 在Purple Shale组中只是发现过指示*Monoclimacis griestoniensis*和*M. crenulata*两个带的笔石, 但后者与*C. centrifugus*带之间竟然缺失了3个笔石带(Štorch, 1994; Mullins和Loydell, 2001). 更有甚者, 牙形类、几丁虫等其他化石研究表明, 本统底部并不能与*C. centrifugus*带对比, 而可能与*C. murchisoni*带相当(Loydell等, 2003; Mullins和Aldridge, 2004; Loydell, 2008, 2011). 这个GSSP剖面位于一个小水塘边, 露头很差, 关键层位更难见到, 几乎无法采集化石供后续研究. 目前, 主要有两种认识, 第一, 原始剖面不变, 但需更改原始定义, 更换Wenlock底界生物地层标志, 例如, 以*C. murchisoni*带作为Wenlock统最底部的带化石; 第二, 寻找和建立一个新的GSSP, 但仍以原始定义的*C. centrifugus*带作为其底界的标志(Melchin等, 2012). 温洛克统的底界, 问题甚为复杂, 共识尚未形成, 已近20年的再研究仍在继续.

(3) 罗德洛统底界层型. 它位于英格兰西部罗德洛镇西偏南5km一个废弃的采石场内, 该统底界划在两个岩石地层单位Much Wenlock组(下)和Lower Elton组(上)之间, 而这些地层中一直没有发现关键的标准化石(Lawson 和 White, 1989). 可想而知, 生物地层完全失控, 作为全球标准也就勉为其难了.

上述3例促使我们思考这样一个问题, 即界线层型被确定后, 如果发现存在严重缺陷, 是否需要和可能进行再研究? 2000年, 在澳大利亚橘城举行的国际志留系分会工作会议上, 与会选举委员与专家强烈要求对志留系部分层型进行再研究, 志留系层型研究遇到了前所未有的挑战. 会上一致同意进行再研究, 但是为了有步骤地进行, 提议先考虑志留系底界和温洛克统底界这两个层型和点位, 分别成立两个工作组; 同时向全体选举和通讯委员征询意见. 最后, 这两个建议获得绝大多数委员的赞同. 于是, 再研究开始启动. 数年后, 分会向国际地层委员会提交了志留系底界的再研究报告(Melchin, 2005), 确认厚3.9m的*P. acuminatus*带地层可进一步再分为下部(厚1.5m)的*Akidograptus ascensus*带和上部(厚2.4m)的*P. acuminatus*带, 志留系底界的点位从*P. acuminatus*带之底改变(定义)为*A. ascensus*带的底, 以后者和*P. praematurus*的首现为标志(Melchin和Williams, 2000), 金钉子剖面维持不变(Melchin等, 2004). 志留系底界的金钉子被改动, 曾遭遇到强大的阻力, Holland等(2003)甚至认为这是“破坏和瓦解了志留纪年代地层框架”, “因而是不合法的”. 但志留系分会再研究的决定最终得到了国际地层委员会和国际众多同行的鼎力支持. 上述方案很快得到国际地层委员会的批准, 同行共同认可, 全球广泛应用.

就“金钉子”再研究而言, 志留系底界的修订是全球首次(Rong等, 2008). 它的实践表明, 科学在进步, 对那些不合理、有严重缺陷的界线层型开展再研究是必要的. 诚然, 年代地层框架必须保持长期的稳定性. 对已建立的界线层型因存在这样或那样问题需要进行再研究时, 一定要采取积极而谨慎的科学态度, 建立必要的再研究科学程序, 精准地做好综合地层学的研究,

旨在更好地树立层型的权威，保护层型的稳定性和可对比性.

当前, 为了提高层型的优质度, 延伸其在区域和全球的对比价值，年代地层学研究不宜只集中在一条界线上，还需注重并大力开展生物、化学、磁性、环境、绝对年龄等多学科领域的综合交叉研究.

## 3 全球志留系地质年代

从全球视野看，志留系地质年代学研究还存在许多问题. 目前世界上志留系较可靠的测年数据不足10个, 这与奥陶系和泥盆系的差距很大. 近10余年里, 对整个志留纪的时限，已经发表了一批不同的数据(Melchin等, 2012), 变化很大(图1). 当然, 这种变化是常态, 以后再变, 不足为怪. 可见, 志留系精准时间框架的建立, 任务还很重, 路程还很长.

为确定志留系各统、阶的起始和结束时间，有关国家学者对相关地层斑脱岩中的锆石多采用铀铅法($^{206}Pb/^{238}U$)或氩氩法($^{40}Ar/^{39}Ar$)来测定绝对年龄，已知数据大都误差较大，普里道利统甚至还是空白的(Melchin等, 2012; Ogg等, 2016).

这里存在几种情况. 年龄值后面正负差值太大, 如美国阿拉斯加东南部兰多维列统Descon组火山灰(*C. cyphus*带到*Stimulograptus sedgwickii*带)年龄(442.59±5.36)Ma. 地层层位未精准确定, 如英国威尔士Butington页岩火山灰(以为仅限于*Monoclimacis crenulata*带)(429.20±2.67)Ma的生物地层控制甚差；上述年龄难以用于精准时间框架中. 瑞典哥特兰岛下Visby组斑脱岩(*Cyrtograptus murchisoni*带中上部或*Pseudooneotodus bicornis*亚带)年龄值(431.83±0.23)Ma较精准，似与温洛克统底界GSSP最接近(Cramer等，2012)，却因后者存在严重缺陷，*C. murchisoni*带还有属于兰多维列统的可能，故它的年龄值仍未确定. 英格兰温洛克统Elton组的斑脱岩(*Neodiversograptus nilssoni*带到*Lobograptus scanicus*带)年龄值为(431.22±3.14)Ma，单从数据看，似隶属于申伍德阶，但所含笔石带(*Neodiversograptus nilssoni*带到*Lobograptus scanicus*带)却属于罗德洛统戈斯特阶的(Kunk等，1985)，可见两者相差甚远. 瑞典哥特兰岛温洛克统侯墨阶Halla组两层斑脱岩(*Pristiograptus dubius parvus*带/*Gothograptus nassa*带

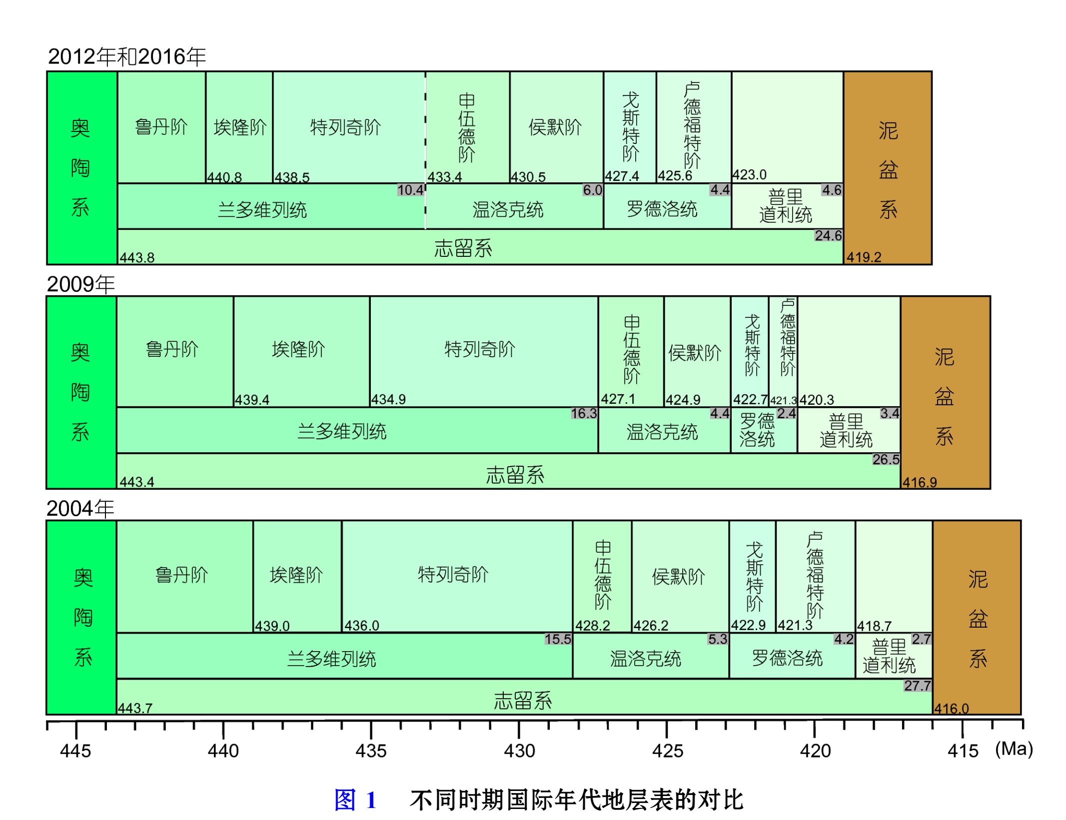



**图 1　不同时期国际年代地层表的对比**

资料分别来自Melchin等(2004), Sadler等(2009), Melchin等(2012) 和Ogg等(2016). 灰色框中示系和统的时长

和*Colonograptus praedeubeli*带上部到*C. ludensis*带下部)的年龄值分别为(428.47±0.72)和(428.06±0.68)Ma; 英格兰Much Wenlock灰岩组上Quarried灰岩段斑脱岩(*C. ludensis*带顶部)的为(427.77±0.68)Ma; 正是有了这些数据(Cramer等, 2012, 2015), 才使国际地质年表中温洛克统下移了6Ma(图1). 可见, 在同位素测年研究中, 精准生物地层学的信息显得多么重要.

我国正式发表的志留系测年数据, 与欧洲的相比就更少了. 湖北宜昌王家湾观音桥层上部斑脱岩铀铅法测年数据(443.2±1.6)Ma(胡艳华等, 2008), 湖南桃源赫坪五峰组顶部斑脱岩铀铅法测年数据(442.2±8.1) Ma(谢尚克等, 2012), 均比国际地质年表奥陶-志留系界线年龄值(443.8)Ma要小. 因为国际上的绝对年龄值是存在疑问的, 因此国内的这些数据是否可靠尚不能确定, 误差值过大总是存在问题的. 无论如何, 奥陶-志留系的分界, 若缺乏可靠生物地层资料, 是很难确定的, 如湘西北地区(戎嘉余等, 2018). 看来, 实验条件和技术方法是一方面; 锆石产出层位的精准则是另一方面.

近年来, 鄂西是我国志留系研究中同位素测年做得最多的地区. 宣恩麻阳寨龙马溪组斑脱岩的年龄值(450.0±3.6)Ma(罗华等, 2016), 似乎落入奥陶系的范围内; 宣恩庆阳坝纱帽组中上部斑脱岩加权平均年龄值(424.5±6.4)Ma, 初以为是温洛克统(李朋等, 2017), 似乎在罗德洛统内(Ogg等, 2016). 然而, 应该指出的是鄂西建始长梁(黄冰等, 2017)和恩施太阳河(闫冠洲等, 2018)的秀山组产牙形类*Pterospathodus eopennatus*超带化石和秀山动物群, 宜归于特列奇阶中部. 可见, 锆石年龄与生物群两者对照, 时代偏差大, 这些数据还有疑问.

综上所述, 因缺少可靠生物带的控制, 国内志留系测年数据尚未发挥应有的作用. 相关工作存在诸多不可控的因素, 各种因素的耦合会大大影响数据的精度. 只有在可靠的生物地层基础上, 采用最先进的技术方法, 地质年代学的成果才有最大的可信度. 就国内而言, 今后宜重点加强华南志留系兰多维列统的测年研究, 期盼有全新的突破.

## 4　中国志留纪各板块地层总体特征

参照大地构造划分方案, 结合志留系的发育特征和生物群面貌, 我国志留纪可能有10个板块和若干地体或微块体(如喀喇昆仑、北山、阿拉善), 前者包括华南(包括钦防海槽)、华北、塔里木、拉萨、羌塘、兴安-阿尔泰、西准噶尔-北天山、柴达木(含祁连山和昆仑山)、滇缅马苏(含滇西)和印支(含滇南)板块(图2), 但是羌塘板块至今没有发现过志留纪地层.

我国各板块的志留系分布和发育各有特点, 现简述如下.

(1) 华南板块. 扬子区是我国志留系研究的经典地区, 是国内其他地区对比的重要参照. 兰多维列统(以陆表浅海、滨海沉积为主, 下部为较深水笔石相和浅水碎屑岩相间夹灰岩相, 中上部主要为浅水介壳碎屑岩相)相当发育, 缺失特列奇阶最上部. 温洛克统分布局限, 主要见于秦岭地区. 罗德洛-普里道利统局部层段发育近岸、浅水沉积(王怿等, 2010, 2011); 小莱采贝动物群(*Retziella* Fauna: BA2-3)或/和微体植物碎片、隐孢子和三缝孢组合系本区生物群主要特征(Rong等, 1995; 王怿等, 2017). 台地沉积厚度很少超过2000m, 边缘地区(如江南区, 与扬子区合并)厚度可逾4000m. 珠江区(粤桂)各统均有发育, 以深水、缺氧、笔石相盆地碎屑岩相沉积为主要特点.

(2) 华北板块. 主体部分(如辽、冀、晋、鲁、陕、豫)缺失志留系; 北缘(如内蒙古南部和吉林中部)发育志留纪晚期浅水相、介壳、灰岩沉积, 含典型的小莱采贝动物群(BA3). 从台地向北还发育深水灰岩相地层(BA4-5), 遗憾的是相关动物群因未研究还鲜为人知. 吉林中部的黑色笔石相地层主要是特列奇期的(刘渭洲等, 1982).

(3) 塔里木板块. 志留系出露于塔里木盆地内部及西北缘. 盆地内部未见地表露头, 而其西北缘发育兰多维列统浅水、近岸、杂色碎屑(紫红色为主)岩层, 最大厚度超过2000m; 未发现其余各统的沉积; 与上覆泥盆系或石炭系呈假整合或角度不整合接触.

(4) 兴安-阿尔泰. 志留系四个统都有分布, 均为火山岛弧型沉积(碎屑岩夹火山岩和火山碎屑岩), 发育以腕足类为主的壳相地层, 最厚近1400m. 兴安区的露头覆盖厚实. 图瓦贝动物群(*Tuvaella* Fauna, BA2-3)的发育是本区浅海底栖生物群的最大特点之一.

(5) 西准噶尔-北天山. 志留系四统发育, 属于活动类型, 碎屑岩夹灰岩、火山碎屑岩, 厚度可逾3500m. 早期为笔石页岩相, 晚期为滨海红色碎屑沉积. 总体

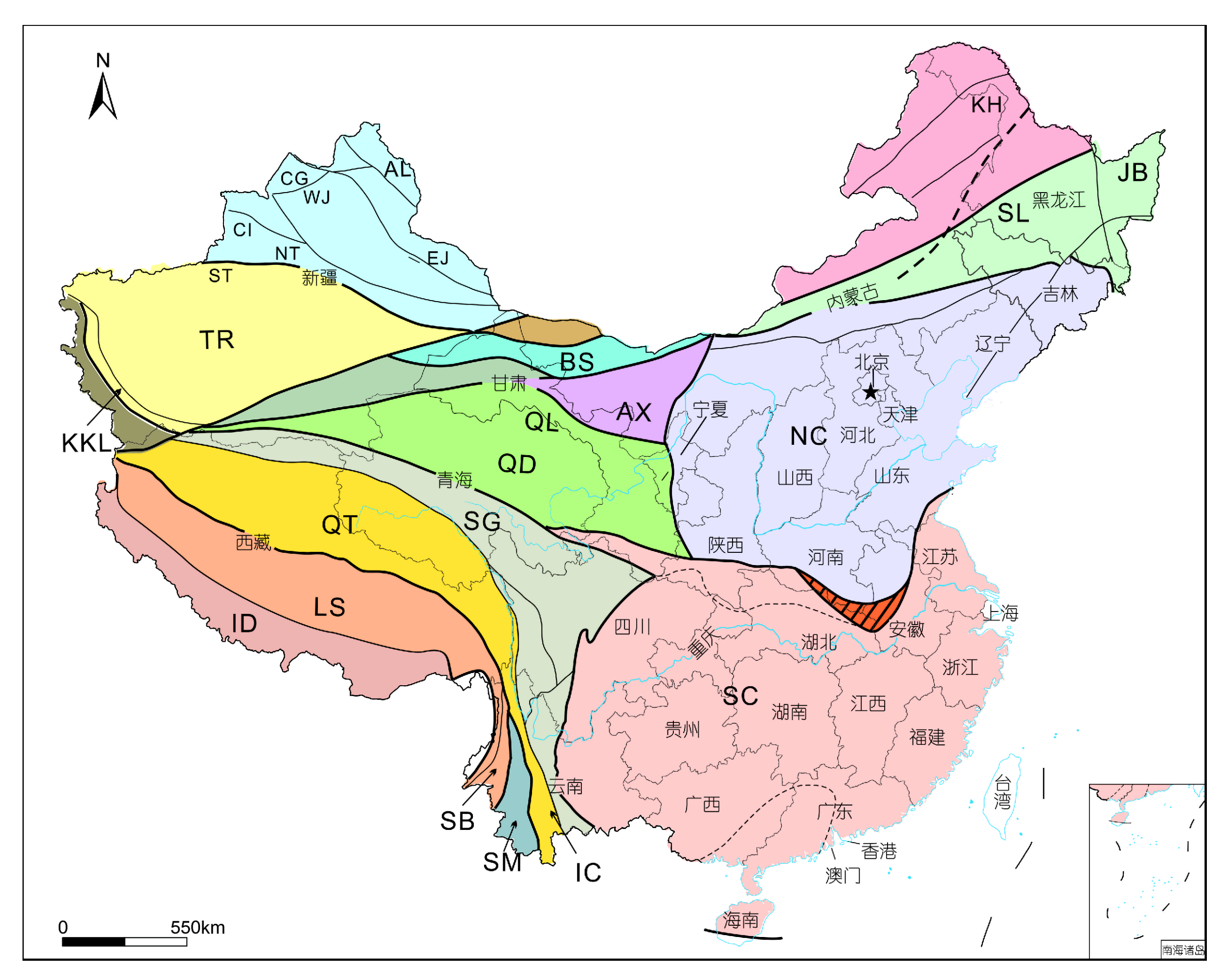



**图 2　中国主要板块位置图**

AL-阿尔泰(Altay); AX-阿拉善(Alaxa); BS-北山(Beishan); CG-钦吉斯(Chingiz); CI-楚-伊犁(Chu-Ili); EJ-东准噶尔(East Zhungar); IC-印支(Indo-China); JB-佳木斯-布列亚(Jamus-Bureya); KH-兴安(Hinggan); KKL-喀喇昆仑(Karakorum); LS-拉萨(Lhasa); ID-印度板块(Indian Plate); NC-华北 (North China); NT-北天山(Northern Tianshan); QD-柴达木(Qaidam); QL-祁连(Qilian); QT-羌塘(Qiangtang); SC-华南(South China); SB-掸泰(Than-Thai)即滇缅马苏(Sibumasu); SG-松潘-甘孜(Songpan-Garzê); SM-思茅(Simao); SL-松辽(Songliao); ST-南天山(Southern Tianshan); TR-塔里木(Tarim); WJ-西准噶尔(West Junggar). 本图的基本格架根据许多文献综合而成, 主要有Zhou和Dean (2006), Rong和Chen(2003), Xiao等(2008, 2009, 2010), Wilhem等(2012), Cocks和Torsvik(2013), Torsvik和Cocks(2017)

研究基础较弱, 地层古生物资料不足. 北山地区似可归于本区.

(6) 柴达木板块(主要材料来自祁连山区). 属于活动类型, 碎屑岩占绝对优势, 地层巨厚, 最厚逾6000m, 发育情况接近华南, 兰多维列统中下部为笔石相, 间夹火山岩及其碎屑岩; 原归于中上统的地层可能宜归于特列奇阶; 与上覆地层呈角度不整合接触.

(7) 拉萨板块. 属于稳定台地相沉积, 4统均有发育; 兰多维列统以细碎屑岩为主, 其余以较深水的灰岩相为主; 野外大化石难寻, 牙形类的发现是关键(林宝玉等, 1989).

(8) 滇缅马苏板块(滇西). 志留系四个统均有出露; 兰多维列统和温洛克统的一部分以笔石页岩相为主; 温洛克统大部及其余两统多以壳相灰岩夹碎屑岩为主(Zhang等, 2014), 与上覆和下伏地层多为整合接触关系.

(9) 印支板块(含滇南). 墨江一带以深水碎屑岩相为主, 局部层位富产浮游相化石(张元动和Lenz, 2001; Wang和Zhang, 2010; Zhang等, 2013). 越南北部罗德洛统浅水碎屑岩相产小莱采贝动物群(Rong等, 1995;

Tong-Dzuy等, 2001).

上述这些板块和相关地体的志留纪地层对比见图3. 从图3中可以看出, 尽管华南扬子区的志留系研究相对更精细些, 但对其他地区的深入研究也是必不可少的, 本世纪以来的研究成果较少, 这正是中国志留系研究需要加强的地方.

## 5　中国志留纪生物和年代地层研究综述

中国志留系的统、阶的划分, 尽管有自己的特色, 但仍多采用国际统一标准和单位名称(Rong和Chen, 2003). 生物地层学以笔石和牙形类为主导门类, 但公认的、完整的分带框架尚未建立. 几丁虫、腕足类、三叶虫、珊瑚、鱼类、植物、隐孢子等各自也发挥一定的作用(Zhou和Zhen, 2008; 赵文金和朱敏, 2014; 王怿等, 2017)(图4). 为方便起见, 本节分成两个部分: 即兰多维列统和其余3个统. 前者的历程很长, 约占志留纪的3/5; 华南作为经典地区, 以兰多维列统发育最好, 研究最细(Mu等, 1989; 陈旭和戎嘉余, 1996; Rong和Chen, 2003; 本文).

### 5.1　兰多维列统

志留系底界, 即兰多维列统鲁丹阶的底界, 以笔石*Akidograptus ascensus*的首现为标志. 该带位于龙马溪组底部, 其下伏*Metabolograptus persculptus*带曾长期归于志留系, 现全球统一置于奥陶系顶部. 兰多维列统埃隆阶和特列奇阶的底界分别置于*Demirastrites triangulatus*带和*Spirograptus guerichi*带(=*S. minor* 带)之底(图4).

鲁丹阶和埃隆阶的笔石带, 研究比较深入, 分带比较清楚. 其中, *D. triangulatus*带延续最长(约1.56Ma), *S. sedgwickii*带最短(约0.27Ma)(陈旭等, 2015), 是否如此, 尚需进一步验证. 就牙形类而言, 奥陶纪末大灭绝结束不久, 牙形类复苏过程较慢, 目前只识别2个带, 它

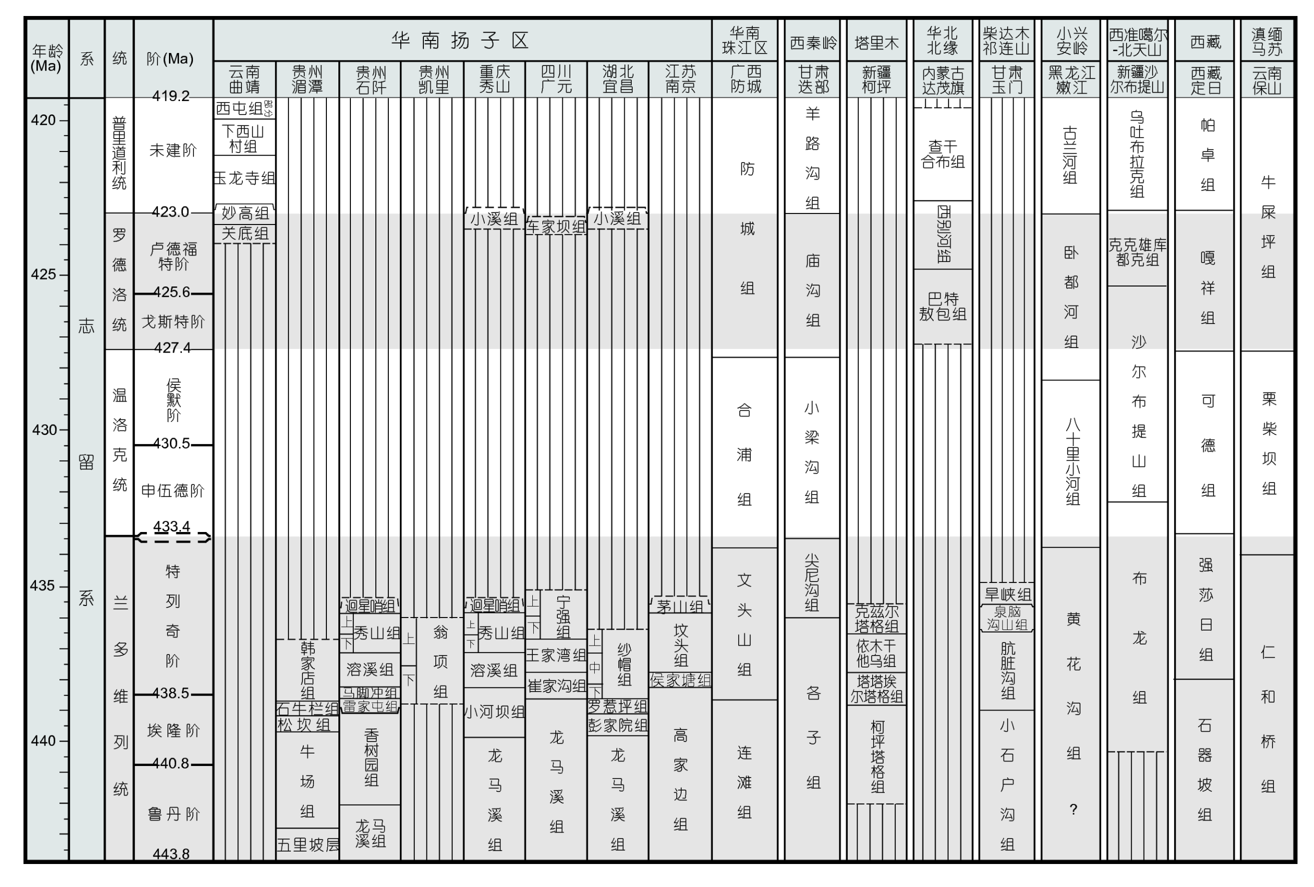



**图 3**　中国主要板块志留系划分和对比图

| 系 | 统 | 阶/年龄 (Ma) | 笔石带 | 牙形刺带 | 几丁虫带 | 腕足类组合或动物群 | 三叶虫组合 | 珊瑚组合 | 鱼类组合动物群 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 志留系 | 普里道利统 | 419.2<br>423.0 | M. transgrediens<br>?<br>Neoc. ultimus | Delotaxis sp. ?<br>Parazieglerodina eosteinhornensis ?<br>Ozarkodina remscheidensis ? | ?<br>Urnochitina thyrae | Pseudolingula<br>仿无洞贝动物群<br>小莱采贝动物群 | Encrinurus tumida Glossoproetus perconvevus<br>Warburgella rugulosa sinensis | Pseudocystiphyllum-Zelophyllum<br>Diplochone-Phailactis | 西屯动物群: Xishancun, Liaojiaoshan<br>? |
| | 罗德洛统 | 卢德福特阶<br>425.6 | Monograptus formosus<br>? | Ozarkodina crispa<br>Ozarkodina snajdri<br>P. siluricus<br>A. ploeckensis<br>K. v. variabilis 动物群 ? | Angochitina sinica<br>Sphaerochitina sp. | Tuvaella gigantea<br>Atrypoidea Fauna<br>Kirkidium knighti<br>Retziella Fauna | Acanthopyge | Micula-Ketophyllum-Kyphophyllum | 潇湘动物群: Hongmiao, Yangtze |
| | | 高斯特阶<br>427.4 | Lobograptus scanicus<br>Neod. nilssoni | K. v. variabilis interval zone<br>Kockella crassa? | ? | | | | |
| | 温洛克统 | 侯墨阶<br>430.5 | Colonogr. ludensis<br>C. praedeubeli<br>Gorthogr. parvus<br>C. lundgreni | O. bohemicus<br>Kockella stauros ?<br>O. sagitta sagitta ? | | 图瓦贝动物群<br>Bailongjiangella-Trigonirhynchioides | Sphaerexochus-Encrinurus | | |
| | | 申伍德阶<br>433.4 | C. rigidus<br>?<br>C. murchisoni | O. sagitta rhenana<br>Kockella ranuliformis<br>K. patula ?<br>? | C. visbyensis | | | | ? |
| | 兰多维列统 | 特列奇阶<br>438.5 | C. centrifugus<br>Cyrtogr. insectus<br>C. lapworthi<br>O. spiralis-Stomat. grandis<br>Monoclim. crenulata<br>Monoclimacis griestoniensis<br>Monoclimacis crispus<br>Spirograptus turriculatus<br>Spirograptus guerichi | Pterospathodus a. amorphognathoides<br>?<br>Pa. cf. lennarti<br>Pa. angulatus<br>P. celloni<br>Pterospathodus eopennatus<br>D. cathayensis<br>O. parahassi<br>Ozarkodina guizhouensis | Angochitina longicollis<br>Plectochitina brevicollis | Tuvaella rackovskii<br>?<br>Nalivkinia magna-Xinanospirifer<br>Salopinella-Spinochonetes<br>西南石燕动物群<br>Nalivkinia elongata-Nucleospira calypta | ?<br>王冠虫动物群<br>Coronocephalus-Kailia-Rongxiella<br>Latiproetus latilimbatus | Idiophyllum Gyalophyoides Chonophyllum<br>Protoketophyllum Pseudophaulactis Crassilasma | 张家界动物群: Maoshan, Fentou, Wentang |
| | | 埃隆阶<br>440.8 | Stimulograptus sedgwickii<br>Lituigraptus convolutus<br>Demirastrites triangulatus | O. pirata<br>Ozarkodina obesa | C. truncata<br>Conochitina rossica<br>Bursachitina rectangularis | Zygospiraella-Spirigerina<br>Sulcipentamerus<br>Paraconchidium | 'Encrinuroides'-Ptilillaenus-Latiproetus<br>'Encrinuroides' zhenxiongensis-Meitanillaenus binodosus | Miikottia-Stauria-Kodonophyllum<br>Dinophyllum-Eostauria-Pilophyllia | |
| | | 鲁丹阶<br>443.8 | Coronograptus cyphus<br>Cystograptus vesiculosus<br>Parakidograptus acuminatus<br>Akidograptus ascensus | Ozarkodina aff. hassi | Conochitina electa<br>Belonechitina postrobusta<br>? | Athyrisinoides-Beitaia-Eospirifer<br>Eostropheodonta-Levenea<br>Dicoelosia<br>Hindella-Sulcatospira<br>华夏正形贝动物群 Cathaysiorthis Fauna | Niuchangella meitanensis<br>Curriella ? | Brachyelasma-Briantelasma-Cystiphyllum | |

**图 4　中国志留纪年代地层和主要生物带划分对比**

根据笔石(陈旭等, 2017; 樊隽轩, 本文)、牙形类(王成源和王志浩, 2016)、几丁虫(唐鹏, 本文)、腕足类(戎嘉余和黄冰, 本文)、三叶虫(周志毅和魏鑫, 本文)和鱼类(赵文金和朱敏, 2014)等的最新资料绘制而成. 与国际标准的对比, 则代表本文作者的最新认识

们的定义和时代尚未精确确认. *Ozarkodina guizhouensis*带穿越埃隆阶和特列奇阶的分界线. 此后, 牙形类演化速率加快, 多样性和丰度大有提高(王成源, 2013; 陈中阳, 2017).

特列奇阶的笔石带序列, 国际上认识莫衷一是, 从4带(Holland和Bassett, 2002)、5带(Rickards, 1976; 陈旭等, 2017), 到7带(Sadler 等, 2009)、8带(Štorch和Massa, 2007; Štorch和Kraft, 2009)、9带(Melchin 等, 2012), 甚至多达10带(Zalasiewicz等, 2009; Loydell, 2012)的. 牙形类研究, 近年来进展较大, 原先在扬子区广泛识别的*Pterospathodus celloni*带, 经再研究大都改归于*P. eopennatus*带(陈立德等, 2002; 王成源等, 2010), 后者在地层上比*P. celloni*带低, 而*P. celloni*只见于川北宁强组上部(王成源和王志浩, 2016). 更往上的*P. amorphognathoides*带, 至今未在扬子区寻获, 但在西藏日土、新疆西准噶尔和北天山等地均有报道(林宝玉等, 1989; 王成源, 2013); 这些带与笔石带之间的精细对比, 如*P. eopennatus*带的底界应对比到哪个笔石带, 尚无定论. 这些分带亦牵涉到溶溪组的时代究竟归于特列奇阶(本文)还是埃隆阶(王成源等, 2010)的问题.

### 5.2　温洛克统、罗德洛统和普里道利统

我国的这3个统, 在发育的完整性和研究的深度上, 都不如兰多维列统, 所含化石组合既零星又分散, 研究制约很大, 连续完整的生物带序列没能建立起来是目前最大的问题.

温洛克统底界的界线层型, 与笔石带如何对比, 成为一大悬念. 最近, 原归于该统底部的*C. centrifugus*带已被改置于特列奇阶的顶部(Zalasiewicz等, 2009), 该金钉子的权威已经被“推翻”了. 陕南紫阳兰多维列统-温洛克统界线地层及笔石带发育连续(傅力浦等, 2006; Wang等, 2013; Tang等, 2015), 对比潜力大, 加强综合研究是当务之急. 温洛克世早期或晚期的笔石带, 在秦岭、滇西和滇南、桂东分散发育(穆恩之等, 1988; 倪寓南, 1997; 倪寓南和林尧坤, 2000; Zhang和Lenz, 1997). 牙形类的个别带化石, 如温洛克统*Ozarkodina bohemica*带已在滇西和藏南记载(林宝玉等, 1984).

罗德洛统底界, 位于笔石*Neodiversograptus nilssoni*带之底. 罗德洛世早期笔石带分散在桂东、陕南、滇南、内蒙古和新疆等地(穆恩之等, 1988; Zhang和Lenz, 1997; 倪寓南和宋礼生, 2002); 晚期的笔石带见于滇南(Zhang和Lenz, 1997). 牙形类的部分带化石, 产自滇东、藏南、甘东南、川北和内蒙古(王成源, 1980; 林宝玉和邱洪荣, 1983; 金淳泰等, 2005; 王平, 2005; 王成源等, 2009). *Ozarkodina crispa*带是志留系历程最短的一个带, 时代归属有两种意见: 1) 它的消失是罗德洛世末的标志(Corradini和Corriga, 2012), 2) 它可延至普里道利世(王成源, 2013; Corradini等, 2015).

普里道利统一直未再分阶, 其底界划在笔石*Monograptus ultimus*带之底. 本统笔石研究有限, 关键在于材料. 本统上部的*M. transgrediens proximus*和下部的*M. ultimus*等见于桂东(汪啸风等, 1977; 穆恩之等, 1988). *M. bouceki*带的一个低分异度组合产自北疆和布克赛尔, 材料得来不易(陈旭等, 1990; Ni等, 1998). 本统牙形类是专业学者关注的焦点, 但虽经大量考察和采样, 分带仍未建立; 唯有*O. eosteihornensis*带的化石零星记载于滇西、藏南和西秦岭(王成源, 2013), 一般指示志留系的顶部.

### 5.3　其他门类化石

我国许多地区的志留纪地层, 因缺少笔石和/或牙形类化石, 还需依靠其他门类确定地层时代(如扬子区兰多维列统, Zhan和Jin, 2007), 如以下生物类群.

(1) 几丁虫在其他宏体化石销声匿迹的细碎屑岩(如泥岩)中, 显得尤为重要. 鲁丹阶的几丁虫分带尚不清楚; 埃隆阶发育系列的化石带(图4), 像小河坝组等对比中, 几丁虫的意义较大. 特列奇阶识别过*Conochitina daozhenensis*带, 最新研究证明(唐鹏, 2010), 该带与*C. brevicollis*带的首现一致、历程相同, 实为同一个带, 大致与笔石*Spirograptus guerichi*-*S. turriculatus*带互比. 往上的*Angochitina longicollis*带, 广布于我国, 历程较长, 一直延至温洛克统. 再往上的分带已具初步框架, 正在深入研究.

(2) 腕足动物化石群以扬子区兰多维列统发育最好, 序列比较清楚(图4). 奥陶纪末大灭绝结束后, 从鲁丹期开始复苏(Rong等, 2013). 埃隆期的腕足动物以五房贝族和无洞贝族占优势, 石燕族也开始分化, 演化速率加快, 进入了辐射时期. 华南、华北罗德洛统的小莱采贝动物群, 除生物地层外, 生物地理区系意义较大(Rong等, 1994, 1995), 与大、小兴安岭和阿尔泰山区志留系的图瓦贝动物群(苏养正, 1981; Rong和Zhang,

1982; Wang等, 2011)一起, 组成了亚澳地区志留纪两大古生物地理实体.

(3) 皱纹珊瑚化石亦以华南扬子区最为丰富, 动物群序列已大致明晰(何心一和陈建强, 2006; 图4); 其中, 以兰多维列统了解得最详细, 宏演化历程初步被揭示(陈建强和何心一, 2004). 埃隆阶(如石牛栏组)、特列奇阶下部(如溶溪组)与特列奇阶中部(如宁强组)的皱纹珊瑚动物群面貌有明显差别, 它们的区域地层对比意义亦不容忽视.

(4) 三叶虫以兰多维列世的多样性最高. 奥陶纪末大灭绝后的鲁丹晚期, 近岸浅水底域的三叶虫率先复苏; 埃隆中晚期多样性递增并向更深水域扩展, 具备辐射规模(周志毅等, 2004; Wei和Zhan, 2017); 特列奇早期, 多样性剧降; 特列奇中期, 华南发育以土著性质浓烈的*Coronocephalus*(即王冠虫)动物群为特征. 温洛克世、罗德洛世和普里道利世的三叶虫, 因地层发育欠佳, 材料零星, 研究水平受限.

(5) 志留纪鱼类及其微体化石多产自近岸浅水海相沉积物中, 以往常被忽视. 近年来, 志留纪鱼类的系统分类学、生物地层学研究越来越深入, 精美的化石不断被发现, 演化生物学和地层对比意义也逐渐显现(朱敏等, 2012; Zhu等, 2013, 2016; 赵文金和朱敏, 2014; Zhao和Zhu, 2015)(图4).

(6) 志留纪是早期陆生植物起源和演化的重要时期, 对其研究不但能认知植物占据陆地的过程, 同时, 一些特有植物类型及其微体植物化石在浅海碎屑相地层划分和对比中是重要的指示化石, 尤其在志留纪晚期地层中, 微体植物碎片、隐孢子和三缝孢组合均有重要的价值(Wang等, 2005; 王怿等, 2010, 2011, 2017).

## 6 中国志留系沉积相差异分布及其控制因素(沉积事件地层)

我国各块体的志留系以浅海细粒碎屑岩占据优势, 但岩相分异强烈. 下面就黑色页岩、浅水碎屑红层和碳酸盐岩及生物礁等时代和对比问题, 做简略的讨论.

### 6.1 黑色页岩

黑色页岩分布在扬子区、滇西及祁连山、吉林、秦岭、昆仑山、西准噶尔等地(图3), 多半是志留纪早期全球海平面速升所带来的大规模缺氧事件的产物. 扬子区是黑色页岩分布最广泛、研究最详细的地区. 上扬子区黑色页岩主要见于兰多维列统中下部, 如龙马溪组(穆恩之, 1964; 汪啸风等, 2004; 樊隽轩等, 2012). 在川北则见于南江组下部(特列奇早期黑色硅质页岩(刘第墉等, 1964; 陈旭, 1984), 假整合盖覆于上奥陶统五峰组之上, 缺失多个笔石带. 下扬子区兰多维列统中下部的黑色笔石页岩, 从鄂东经赣北、皖南至苏南的梨树窝组(方一亭等, 1990)和高家边组(Li等, 1984; 陈旭等, 1988), 主要为黑色、灰黑色页岩、细砂岩和粉砂岩(以下部为主, 厚薄不一)(樊隽轩等, 2012); 砂质含量较高, 碎屑供给来自东南方向的华夏古陆, 与上扬子区龙马溪组的黑色页岩有明显差异.

扬子区各地奥陶系-志留系分界地层的黑色页岩, 有不同层位(如龙马溪组底部、下部或中下部), 厚薄差异大, 如黔东北石阡雷家屯的龙马溪组厚仅4m(鲁丹阶下部), 黔北、川南等地的厚度最大, 长宁双河厚达229m(直到埃隆阶顶部), 向北和向东变薄. 从岩石地层角度考虑, 很多地区的龙马溪组由两部分组成, 即下部黑色页岩和中上部灰绿色页岩或粉砂岩、砂岩(葛治洲等, 1979; 樊隽轩等, 2012)[1]. 其中, 中上部的与下部真正的黑色页岩有明显差别; 滇北、川西的“龙马溪组”间夹许多灰岩和砂岩, 均宜另起新名(组或段).

志留纪早期的黑色页岩, 不仅在华南广布, 其他地区也有很多发育(图5). 但后者大都系活动类型, 黑色页岩多以夹层的形式出现在大套碎屑岩中, 并伴随不同程度的变质, 而呈灰色、灰黑色的板岩, 与扬子台地上的特征明显不同. 在粤西连滩地区, 发育一套黑色、灰黑色的页岩和板岩地层, 富含笔石, 自下而上被命名为连滩组和文头山组(Mu, 1948; 汪啸风, 1978; 图5). 在滇西保山、施甸等地(属于滇缅马苏板块)的仁和桥组也发育黑色笔石页岩(倪寓南等, 1982), 其底界下延至上奥陶统赫南特阶的*M. extraordinarius*带(Zhang等, 2014).

上述黑色页岩不仅见于我国, 也见于国外很多地方, 这意味着其沉积始于奥陶纪末赫南特冰期之后的全球大幅度海泛事件. 它的起始时间大致相同, 而结束时间各地则参差不齐, 由此反映了区域构造运动的

1) 王立亭. 1976. 贵州的志留系. 贵阳: 贵州省革命委员会地质局. 1–68

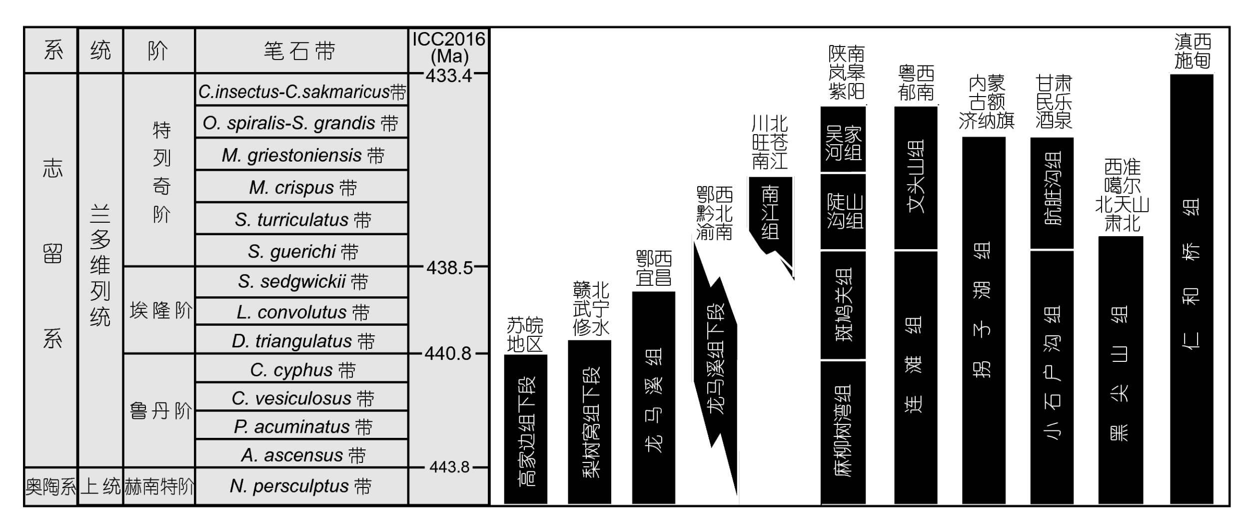



**图 5**　华南志留系兰多维列统黑色页岩与笔石分带对比

强烈影响. 例如, 由于广西运动自东南向西北(现今之定向, 下同)阶段性推进(陈旭等, 2014), 使上扬子区北部黑色页岩顶界普遍高于东南部的; 在湖北京山、宜昌、来凤等地龙马溪组黑色页岩顶界位于埃隆阶中上部; 至湖北竹山、神农架, 重庆巫溪、城口, 四川威远等地, 其顶界进入到特列奇阶中下部.

应该说明的是, 以往在总结志留纪沉积矿产时, 常寥寥数语、一笔带过. 近年来, 龙马溪组的黑色页岩已被视为中国南方页岩气勘探的核心层段之一. 随着重庆涪陵和四川长宁、威远等地产出稳定工业气流(邹才能等, 2015; 陈旭等, 2017), 对该目的层的勘探和开发研究倍受重视, 期盼取得更新的研究成果.

### 6.2　浅水碎屑红层

红层的发育是还原、缺氧环境被氧化条件替代的一个地化事件, 能够反映区域或全球气候的变化. 志留纪海相红层广布于亚、欧、美(Ziegler和McKerrow, 1975; Rong等, 2003; Brett等, 2012), 类型多样, 成因各异(Kiipli, 2004; McLaughlin等, 2012; Liu等, 2016). 我国扬子区、塔里木、祁连山等地的志留系红层以紫红与黄灰绿色碎屑岩互层为特征, 是近岸浅海产物, 属于浅水碎屑红层, 具有区域地层划分和对比的意义(葛治洲等, 1979; 陈旭和戎嘉余, 1996; Rong等, 2003, 2012; Zhang等, 2014; Liu等, 2016)(图6).

扬子区的浅水碎屑红层沉积于广西运动广泛影响的华南前陆盆地内, 自下而上发育3套:

(1) “下红层”(如溶溪组). 时代归属有3种意见, 特列奇期早期(穆恩之等, 1982; 戎嘉余等, 1990; Rong等, 2012), 埃隆-特列奇期交界期和埃隆晚期(王成源等, 2010; 王成源, 2013). 陕南王家湾组因其下伏地层产*Spirograptus turriculatus*, 川东白云庵组因其下伏层位产*S. guerichi*, 均被归于特列奇阶下部(陈旭等, 1990; 陈中阳, 2017). 今后, 王家湾组、白云庵组与溶溪组之间如何精时对比是一项重要的工作.

(2) “上红层”(如迴星哨组). 因各地剥蚀程度有别, 残留厚度多变, 关键的标准化石尚未发现, 时代归属仍未确定. 考虑到迴星哨组与下伏秀山组关系甚为密切, 湘西北张家界、滇东北大关等地的秀山动物群可上延到迴星哨组, 故暂归于特列奇中期.

(3) 第三套红层(如小溪组). 散布于扬子区腹地的小溪组, 多属于罗德洛统最高牙形类带*Ozarkodina crispa*带, 相当于滇东曲靖马龙的部分关底组和妙高组(王成源, 1981), 只是后两者沉积时海水较深, 速率很快. 川北广元车家坝组层位稍低, 属于*O. snajdri*带(唐鹏等, 2010). 这套红层系罗德洛世晚期沉积, 或能延续到普里道利世初期(王怿等, 2017).

广布于扬子区的志留系浅水碎屑红层, 具备类似的分布特点, 如靠近古陆的, 红层较厚、单层数较多且厚度较大; 远离古陆的, 红层数变少, 红层总厚度越来越薄. 由此推测它们受控于相似的背景因素, 包括存在古陆和强风化剥蚀作用, 河流提供富含高价铁的物源, 沉积和埋藏速度快, 海域有机质含量偏低, 水动力

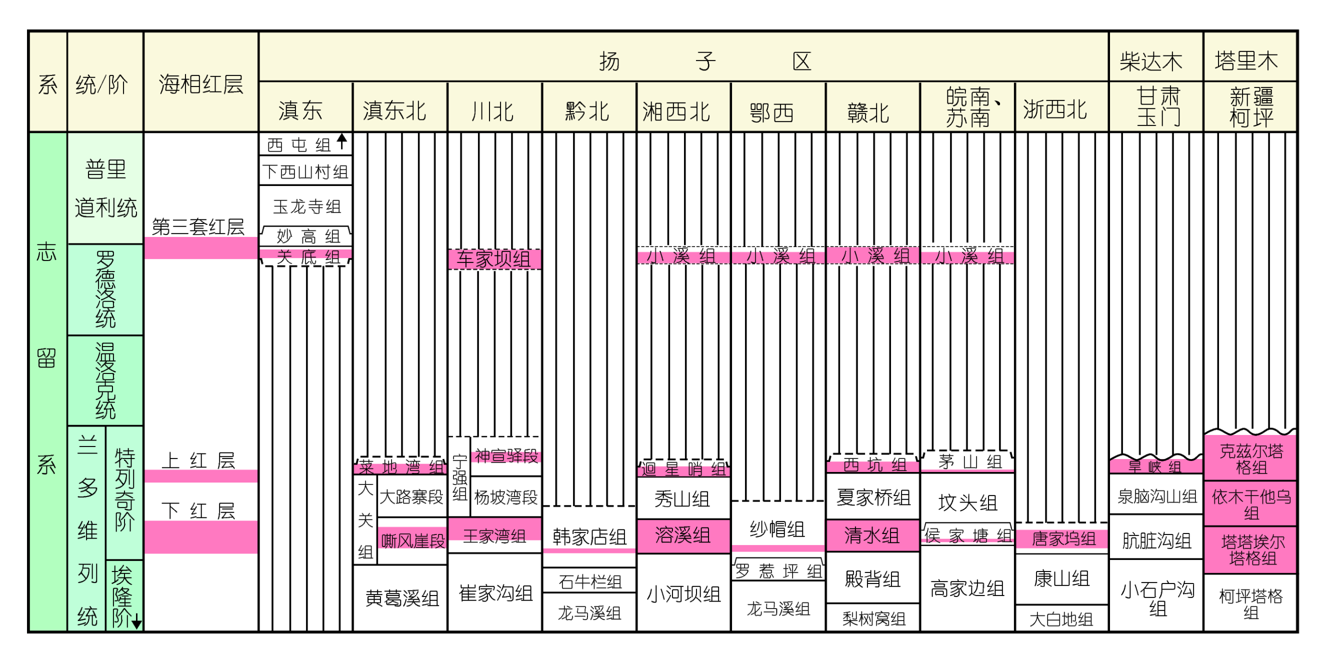



**图 6　中国主要块体志留系海相碎屑红层的划分和对比**

较弱，底质界面呈氧化状态(Rong等，2012；Zhang等，2014; Liu等, 2016).

特列奇期海相红层在中低纬度广泛发育，指示海洋从还原到氧化的条件变化和全球海平面下降(Haq和Schutter, 2008). 异地、近乎等时的海相红层可能代表对全球事件的响应，如下红层可能沉积在全球海面下降和温度降低之时(Rong等，2012；McLaughlin等，2012；Liu 等，2016)；上红层则是沉积在全球气候回暖、水体氧化加剧之时(McLaughlin等, 2012). 古陆上发育足够规模的河流是浅水碎屑红层存在的重要地质背景, 伴随着地壳抬升作用后强烈的剥蚀作用, 为浅水碎屑红层的沉积提供了充足的陆源物质(Rong等，2003, 2012; Zhang等, 2014).

塔里木志留系浅水碎屑红层，包括塔塔埃尔塔格组、依木干他乌组和克兹尔塔格组，沉积连续，厚度很大，曾被归于泥盆系. 30年的研究证实，其鱼类化石群(如依木干他乌组发现的棘鱼类)与扬子区相近，时代亦相同(王朴等，1988；刘时藩，1995；王念忠等，1998, 2010; Sansom等，2005；赵文金等，2009). 牙形类的资料与鱼类的观点并不相悖(张师本和王成源，1995). 唯有克兹尔塔格组上段，根据鱼类被归于罗德洛统上部(赵文金和朱敏，2014；Zhao和Zhu，2015)，但尚待寻找更多的新证据；若此说有理，该组上段应另起新名.

祁连山区的志留系也发育碎屑红层(即旱峡组)，但时代尚未确定. 本文暂将旱峡组划入特列奇阶. 无论如何, 就海相浅水红层的发育程度而言, 华南、塔里木和柴达木等块体在志留纪时的地理关系，明显超过与其他块体的亲密程度.

## 6.3　碳酸盐岩和生物礁相

我国志留纪地层碳酸盐岩偏少，强蒸发环境的白云坪更为鲜见，碳酸盐岩更缺失深水、缺氧的标志. 碳酸盐岩主要发育在西藏、新疆、华南、内蒙古等地, 以扬子台地的研究最多. 已知生物礁多见于上扬子台地兰多维列统，近年研究侧重剖析其时空分布、古生态学和沉积学. 研究表明，这些与生物礁有关的都是狭适性的底栖群落，但其分类组成及生态习性则表现出多元化的特点，型式差异较大.

在上扬子区内，黔北和黔东北是埃隆中期碳酸盐岩发育得较好的地区. 黔北浅海区，海水清澈，底栖群落碳酸盐岩生产力剧增, 石牛栏组由近岸叠层石(Li等, 2017)-远岸珊瑚-层孔海绵点礁(Wang等，2014)及多类滩相(如腕足类*Paraconchidium*介壳滩)组成；生物礁最终因桐梓上升而终结. 黔东北石阡沿岸区香树园组顶部白沙型珊瑚-层孔海绵群落，代表生物礁复苏阶段

(Li和Kershaw, 2003); 点礁厚约20余米、直径百余米, 礁前塌积岩和礁后薄层生屑滩分异清楚, 因海水深度增加和浑浊度增高使其停止生长(倪超等, 2016).

特列奇早期陆源碎屑沉积速率快, 浑浊海底强烈抑制造礁群落的生长规模, 目前只在黔北桐梓韩家店组细碎屑岩夹层中可见米级厚度的珊瑚-苔藓虫点礁(李启剑等, 2012). 特列奇中晚期, 偌大的扬子区唯有陕南川北宁强组发育多期珊瑚-层孔海绵点礁, 红色动物格架岩-附礁生屑灰岩共同形成数十米高的大、中型点礁(陈旭和戎嘉余, 1996), 礁间发育数百米至数千米展布的腕足类、三叶虫、头足类介壳滩. 短暂而频繁出现的清澈海水在扬子上升过程中完全消失(陈旭、戎嘉余, 1996; Li等, 2002).

兰多维列世中晚期发育的4个主要造礁期的实例表明, 上扬子区碳酸盐岩及生物礁的时空分布、生长规模, 与陆表海区海水浑浊度的变化、海平面波动和构造变动密切相关(张廷山等, 1999). 近岸-远岸的水深变化, 造成局限海区造礁群落的生态的强烈分异.

## 7 中国志留系构造地层特征与证据

近20年来, 华南志留系研究的一大进展是罗德洛世晚期浅水海相地层在扬子台地内部被发现, 而以前常被认为是缺失的(如葛治洲等, 1979; 戎嘉余等, 1990). 这套地层最早发现于川西和川北(金淳泰等, 1989; 万正权等, 1991), 处于台缘地区(Rong 等, 2003). 后来, 川、黔、渝、湘、赣、皖等省区不断发现以罗德洛世晚期为主的地层, 表明该期海水已入侵台地中央, 范围比原先想象的大得多(耿良玉等, 1999; 王怿等, 2010, 2011, 2017; 马会珍和王雪华, 2014; 赵文金等, 2016). 台缘地区地层时代的确定主要根据是海相化石, 包括牙形类*Ozarkodina snajdri*, *O. crispa*及腕足类*Retziella*动物群等, 如川北车家坝组(唐鹏等, 2010), 时代以罗德洛世晚期为主, 可延至普里道利世早期.

但是, 在台地内部正常海相化石绝迹或极少的情况下, 标志性化石来自于植物界和脊椎动物. 前者发育*Prototaxites*组合(王怿等, 2017), 类表皮Category1-3 (Edwards, 1982)组合, 管状体*Laevitubulus tenuis-Porcatitubulus microannulatus-Constrictubulus cristatus*组合, 三缝孢*Apiculiretusispora-Emphanisporites-Aneurospora*组合和隐孢子*Artemopyra brevicosta-Hispanaediscus verrucatus-Pseudodyadospora laevigata*组合(Wang等, 2005). 脊椎动物为一套特殊的鱼类化石群(即以"*Wangolepis*"为特征的扬子组合)(赵文金和朱敏, 2014). 此外, 该套地层还产大型虫管遗迹*Palaeophycus-Planolites*组合和疑源类*cabottii*组合. 上述化石的联袂产出是扬子台地志留纪晚期地层存在的标志. 受广西运动的影响, 近岸浅水沉积发育, 堆积物颗粒变粗(砂岩、粉砂岩), 局部夹粉砂质泥岩和泥岩.

值得指出的是, 我国志留系经典剖面湖北宜昌大中坝的纱帽组最顶部(即汪啸风等, 1987的第四段), 最近也发现了上述化石组合(王怿等, 2018), 尽管渝、鄂边区的秭归、建始、巫山等地并无小溪组的可能(李志宏等, 1999), 但仍可推断, 罗德洛世晚期的海水已然浸漫到了鄂西地区, 这样, 对华南志留纪晚期的岩相地理概貌有了一个新的认识(图7).

4亿多年前发生在华南的广西运动, 除少数(如广西)外, 大部分地区都表现为升降变化. 根据地层之间的接触关系与时代, 志留纪时华南台地上升有以下4次(图8).

(1) 宜昌上升. 奥陶纪末-志留纪初, 湘鄂黔渝边区出现上升事件, 局部地区露出水面, 遭遇风化剥蚀; 上升的持续时间以鄂西五峰地区为最长(逾5Ma)(Sun, 1943; 穆恩之, 1954; 陈旭等, 2001; 王怿等, 2013b), 表现为龙马溪组的不同层位与下伏五峰组或临湘组之间的假整合接触. 这一升降运动在各地的性质和精确时限尚未定论.

(2) 西乡上升. 兰多维列世早中期(特别是埃隆期, 约3Ma), 大巴山区中西段的局地构造运动(陈旭等, 1990), 主要体现为南江组与下伏龙马溪组之间的假整合接触.

(3) 桐梓上升. 埃隆晚期(可能不足0.1Ma), 黔中古陆北缘一次局地、短暂、海面升降并伴有区域构造运动(戎嘉余等, 2012; 王怿等, 2013a), 以石牛栏组与韩家店组之间的假整合接触为典型代表.

(4) 扬子上升. 共包括两幕, 第一幕是指特列奇早期或中期, 扬子区整体抬升出海面(韩家店组、秀山组、迴星哨组或宁强组沉积之后), 以黔东北石阡、渝东南秀山、湘西北张家界等地最为典型, 秀山组及其相当地层被罗德洛世晚期地层所盖覆(间断长约10Ma); 第二幕是指罗德洛世晚期扬子台地接受短期

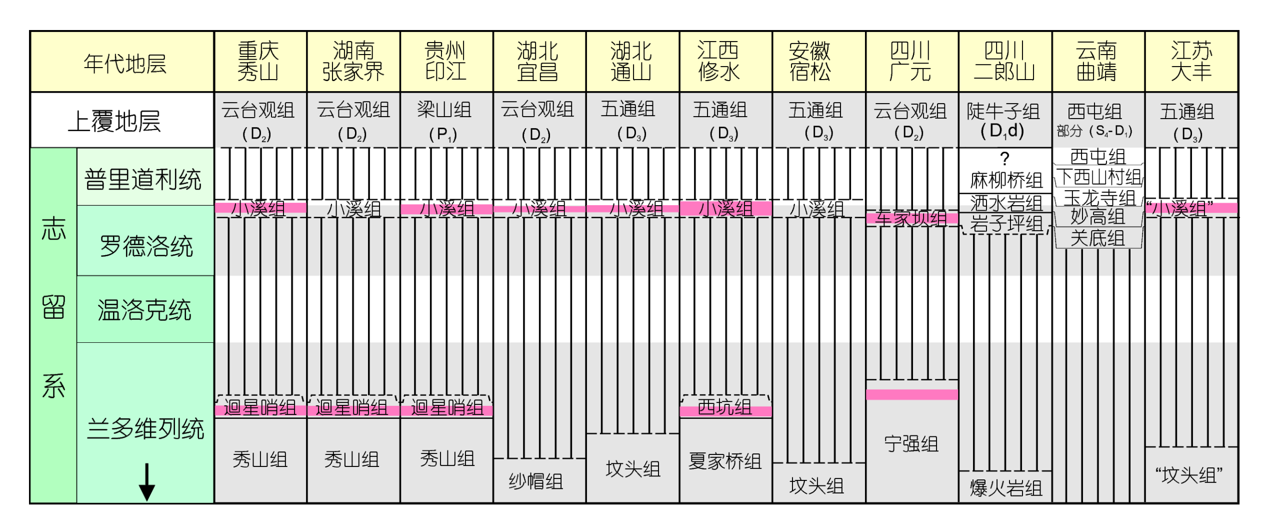



**图 7　扬子区志留纪晚期地层划分和对比**

沉积(车家坝组、小溪组)后，再次整体隆升，直至中、晚泥盆世或以后才接受海相沉积. 这是华南板块古生代地质发展史上，规模最大的一次地壳整体上升运动(间断长达40~150Ma)(戎嘉余等，1990；Rong等，2003，2012). 正是这次上升运动之后，华南晚古生代(南高北低)的沉积、岩相、古地理格局发生了重大变化，与早古生代(西高东低)的格局有明显的不同.

上述以升降运动为主要表现形式的地壳变化是如何形成的，还有不同的认识. 一种认为是华夏古陆不断有节律地向西北扩张，致使华南不同地区受广西运动的差异冲击；另一种推测可能与全球海平面的升降有重要关系，如扬子上升的前后两幕分别与特列奇晚期和罗德福特晚期全球海平面的大幅下降(Haq和Schutter，2008)有关联. 至于华南地壳升隆变化是否与发育地幔柱活动有关，尚待寻找确凿的证据.

## 8　中国志留纪化学地层研究的初探

20世纪很多学者认为，全球志留纪世界性化石多，气候分带不明显，海陆生物很繁盛，是一个稳定的、温暖的地质时期(如Boucot和Johnson，1973；Ross，1975；Boucot，1975；Joachimski等，2009；Foster等，2017). 然而，近年来，化学地层研究表明，从奥陶纪晚期到志留纪，全球气候呈现了反复多变的特点，$\delta^{13}C_{carb}$漂移事件多次发生(图9)，其变化幅度可与显生宙某些大灭绝期类比(Cramer等，2006，2011；Calner，2008). 如埃隆晚期、温洛克世早期、罗德洛世晚期的正漂移；特列奇中晚期、温洛克世早、晚期和罗德洛世晚期在瑞典、加拿大极区与Anticosti岛、苏格兰、爱沙尼亚等地均有冰川记录的证据；至于南美玻利维亚、巴西志留纪冰碛岩的研究，尚未引起足够的重视(Diaz-Martinez和Grahn 2007).

我国志留系的碳、氧、锶、硫等同位素研究还是近20年的事. 相关工作在四川、云南和新疆开展过(张廷山等，1996，1998；李忠雄和钱咏臻，2001；张金亮和张鑫，2006)，或在研究奥陶纪末大灭绝事件中有所涉及(汪啸风和柴之芳，1989；王传尚等，2005；Fan 等，2009). 最近，在四川盐边识别出上兰多维列统到下罗德洛统$\delta^{13}C_{carb}$连续曲线，其变化趋势与国际上的主要趋势可以对比(王怿等，2016)，识别出温洛克世的2个事件：艾尔韦肯事件(Ireviken Event：申伍德早期)(下稗子田组中下部，正漂移幅度达4.27‰)和墨尔德事件(Mulde Event：侯默中期)(上稗子田组上部到沟口组底部，双峰正漂移)(图8). 值得注意的是，该剖面上并未发现罗德洛世晚期的劳事件(Lau Event)，这与王成源等(2009)根据牙形类的证据得出的观点不谋而合.

劳事件发生在罗德洛世晚期*Polygnathoides siluricus*带与*Ozarkodina crispa*带之间，是显生宙全球$\delta^{13}C_{carb}$正漂移幅度最大的事件之一(但并未伴有生物大灭绝事件)，在瑞典、爱沙尼亚、英国、挪威、俄罗斯、美国、加拿大、澳大利亚、新西兰等国的相关地层中均已识别出. 我国的情况怎样，值得进一步工作.

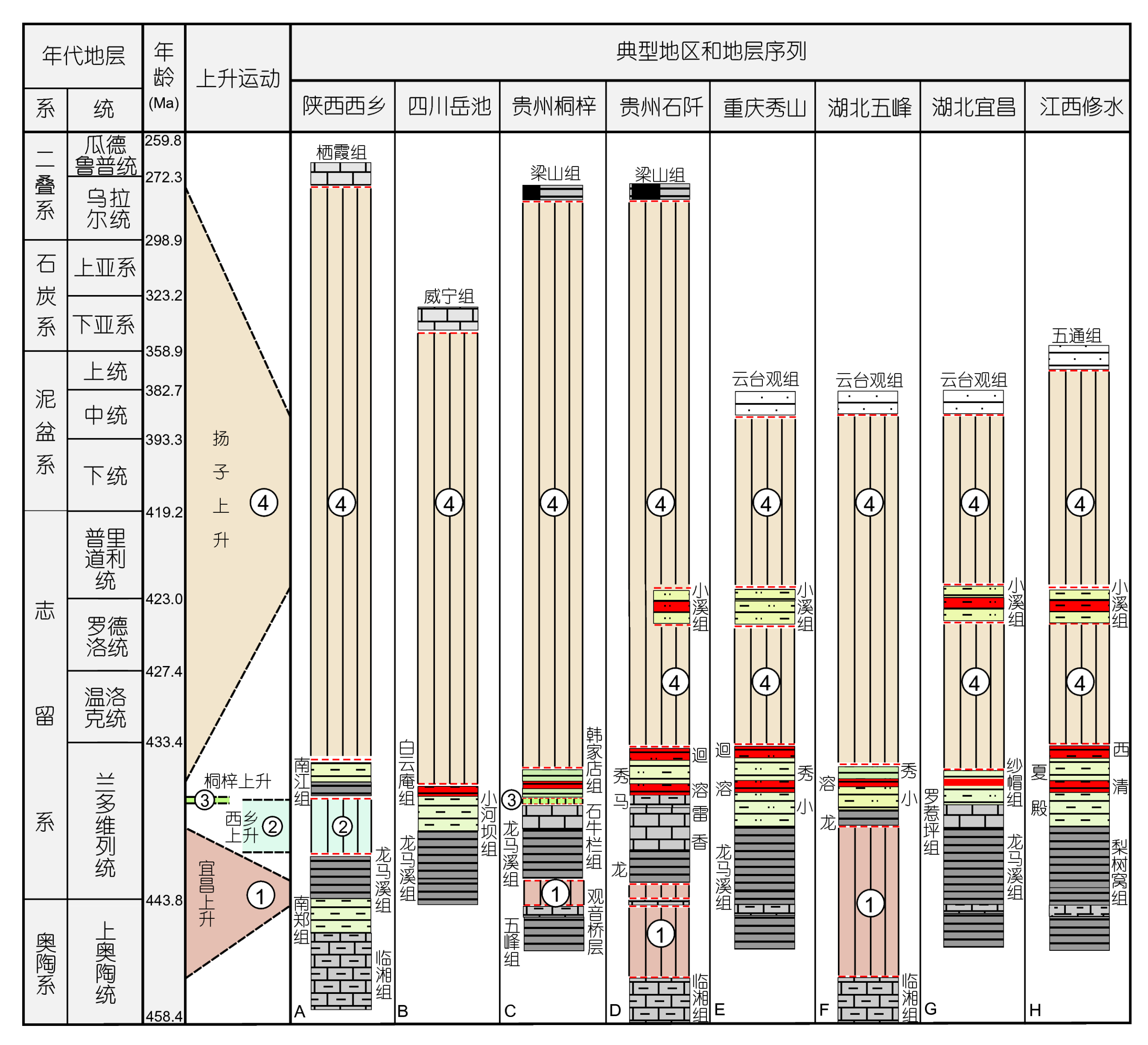



**图 8**　志留纪扬子区不同上升运动分布和对比图

殿-殿背组; 迴-迴星哨组; 雷-雷家屯组; 清-清水组; 溶-溶溪组; 西-西坑组; 夏-夏家桥组; 小-小河坝组; 香-香树园组; 秀-秀山组

我国志留-泥盆系界线的研究, 也开始采用地球化学方法. 云南曲靖妙高组到玉龙寺组的$\delta^{13}C_{carb}$连续变化曲线指示志留系顶界位置似乎不在玉龙寺组之顶(图9), 而在更高层位之中(Zhang等, 2014). 西秦岭的志留-泥盆系界线地层的$\delta^{13}C_{org}$变化曲线, 与国际标准Klonk剖面对比, 揭示两系分界位置可能临近羊路沟组顶部(Zhao等, 2010, 2011), 这与根据腕足类仿无洞贝动物群(*Atrypoidea* Fauna)的发育所得出的结论基本一致(戎嘉余等, 1987).

当生物地层研究难以得出确切可靠的结论时, 结合化学地层学方法进行划分和对比不失为一种值得尝试、且可付诸实践的有效的补充手段. 但要特别注意地层对比的精度和实验技术方法的可靠性与准确性.

## 9　问题和展望

基于中国志留系研究的现状, 本文拟提出今后研究需关注的8个问题.

(1) 综合地层学. 中国众多板块或地体有独立或相关的地质背景. “华南志留系发育完整、三分清楚且是

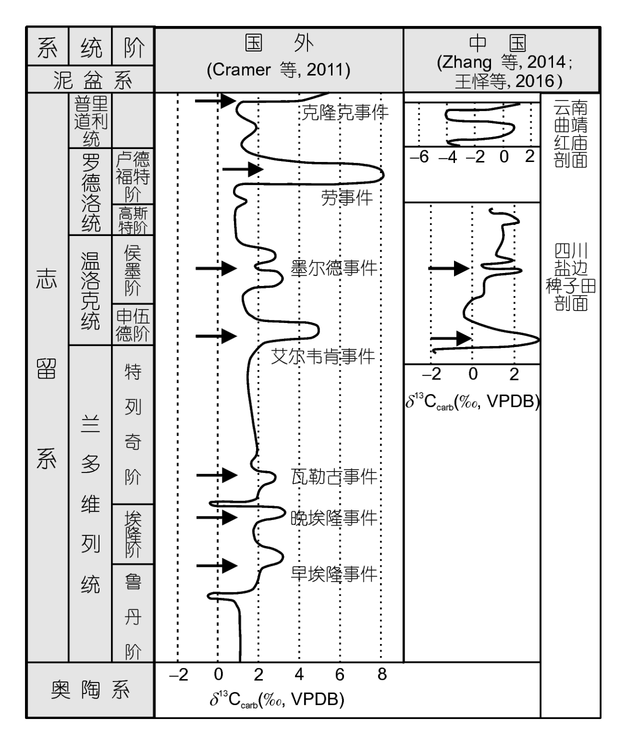



**图 9　国际和川西盐边温洛克统、滇东曲靖罗德洛统-普里道利统$\delta^{13}C_{carb}$变化曲线对比**

中国的标准"的传统理念必须改变. 温洛克、罗德洛和普里道利三个统, 因各地所含化石组合零星且高度分散, 连续的生物带序列没能建立起来, 需特别关注; 重视不同块体、不同相区的精时地层对比研究; 基于中国材料的综合地层学在某些金钉子再研究中应发挥重要作用.

(2) 演化古生物学. 重视化石采集与生物多样性多寡的关系以及稀有或常见属种在宏演化中的特殊意义; 加强系统分类、居群变异和群落以及演化谱系研究, 不断提升我国古生物学研究实力, 并提高我国生物地层学划分和对比的精度.

(3) 使用定量方法和应用统计软件, 严格把关数据资料的准确性和可靠性, 挖掘和发挥它们的科学潜能, 做好数据库的顶层设计, 充分展现数据库在志留系研究中的作用.

(4) 我国志留纪块体多, 沉积相多变, 有开展化学地层学、事件地层学和磁性地层学研究的基本条件(如拉萨板块), 期盼中国的相关成果在国际上占有一席之地.

(5) 全球志留系较可靠的地质年龄不到10个(Melchin等, 2012), 相关研究在我国更是明显滞后; 有目的地选择相关统和阶的底界年龄, 为全球精时地层对比提供重要参考; 期盼华南龙马溪组下部斑脱岩年龄测定有重要突破.

(6) 全球古地理再造离不开中国生物地理和地球物理研究(Torsvik和Cocks, 2017); 要提升古地理研究的精时性(如1Ma、甚至更窄的时间段), 再造志留纪不同时期我国主要块体古地理位置及其随时间推移的系列演变.

(7) 志留系红、黑两套岩相指示不同沉积条件和海域环境, 还需与沉积学、地球化学、古环境、古气候等领域交叉融合, 聚焦本区, 眼望全球, 做好综合研究.

(8) 志留纪是陆地生态系统建立、初步形成和早期演化的关键时期. 我国志留纪发育近岸碎屑岩相沉积和陆地植物, 建立依据中国证据的植物早期演化和环境演变模式, 期盼为揭示全球气候变迁做出贡献.

## 参考文献

陈建强, 何心一. 2004. 上扬子区早志留世四射珊瑚的复苏与辐射. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 169–186, 1044–1045

陈立德, 陈孝红, 李志宏, 汪啸风, 王传尚. 2002. 志留系. 见: 汪啸风, 陈孝红, 张仁杰, 主编. 长江三峡地区珍贵地质遗迹保护和太古宙-中生代多重地层划分与海平面升降变化. 北京: 地质出版社. 101–130

陈旭, 樊隽轩, 陈清, 唐兰, 侯旭东. 2014. 论广西运动的阶段性. 中国科学: 地球科学, 44: 842–850

陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 王红岩, 聂海宽, 石学文, 文治东, 陈冬阳, 李文杰. 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. 中国科学: 地球科学, 47: 720–732

陈旭, 樊隽轩, 张元动, 王红岩, 陈清, 王文卉, 梁峰, 郭伟, 赵群, 聂海宽, 文治东, 孙宗元. 2015. 五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定. 地层学杂志, 39: 351–358

陈旭, 李积金, 耿良玉, 丘金玉, 倪寓南, 杨学长. 1988. 江苏下扬子地区的志留系. 见: 江苏石油勘探局, 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 江苏地区下扬子准地台震旦纪-三叠纪生物地层. 南京: 南京大学出版社. 127–168

陈旭, 戎嘉余, 周志毅, 张元动, 詹仁斌, 刘建波, 樊隽轩. 2001. 上扬子区奥陶-志留纪之交的黔中隆起和宜昌上升. 科学通报, 46: 1052–1056

陈旭, 戎嘉余, 主编. 1996. 中国扬子区兰多维列统特列奇阶及其与

英国的对比. 北京: 科学出版社. 1–162
陈旭, 徐均涛, 成汉钧, 汪明洲, 陈祥荣, 许安东, 邓占球, 伍鸿基, 丘金玉, 戎嘉余, 1990. 论汉南古陆及大巴山隆起. 地层学杂志, 14: 81–116
陈旭, 张元动, 樊隽轩, 唐兰, 孙海清. 2012. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据. 中国科学: 地球科学, 42: 1617–1626
陈旭, 1984. 陕西及川北志留纪笔石并论单笔石的分类. 中国古生物志, 总号166册, 新乙种20号. 北京: 科学出版社. 1–102
陈中阳. 2017. 华南志留纪兰多维列世牙形动物群兼论同期全球牙形动物古地理. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–242
樊隽轩, Melchin M J, 陈旭, 王怿, 张元动, 陈清, 迟昭利, 陈峰. 2012. 华南奥陶-志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学. 中国科学: 地球科学, 42: 130–139
方一亭, 梁诗经, 张大良, 余金龙. 1990. 江西省武宁县梨树窝组及其笔石. 南京: 南京大学出版社. 1–155
傅力浦, 张子福, 耿良玉. 2006. 中国紫阳志留系高分辨率笔石生物地层与生物复苏. 北京: 地质出版社. 1–151
葛治洲, 戎嘉余, 杨学长, 刘耕武, 倪寓南, 董得源, 武鸿基. 1979. 西南地区的志留系. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 西南地区碳酸盐生物地层. 北京: 科学出版社. 155–220
耿良玉, 王玥, 张允白, 蔡习尧, 钱泽书, 丁连生, 王根贤, 刘春莲. 1999. 扬子区后Llandovery世(志留纪)胞石的发现及其意义. 微体古生物学报, 16: 111–151
何心一, 陈建强. 2006. 扬子区奥陶纪、志留纪四射珊瑚分类、生物地层与生物古地理新认识. 地学前缘, 13: 145–152
胡艳华, 周继彬, 宋彪, 李卫, 孙卫东. 2008. 中国湖北宜昌王家湾剖面奥陶系顶部斑脱岩SHRIMP锆石U-Pb定年. 中国科学 D辑: 地球科学, 38: 72–77
黄冰, 王怿, 唐鹏, 魏鑫, 张小乐, 王光旭, 吴荣昌, 张雨晨, 詹仁斌, 戎嘉余, 2017. 湖北西部建始地区志留系秀山组顶部地层新观察. 地层学杂志, 41: 375–385
金淳泰, 钱咏臻, 王吉礼. 2005. 四川盐边地区志留纪牙形石生物地层及年代地层. 地层学杂志, 29: 281–294
金淳泰, 万正权, 陈继荣. 1997. 上扬子地台西北部志留系研究新进展. 特提斯地质, 21: 142–181
金淳泰, 万正权, 叶少华, 陈继荣, 钱泳蓁, 易庸恩. 1992. 四川广元、陕西宁强地区志留系. 成都: 成都科技大学出版社. 1–97
金淳泰, 叶少华, 江新胜, 李玉文, 喻洪律, 何原相, 易庸恩, 潘云唐. 1989. 四川二郎山地区志留纪地层及古生物. 成都地质矿产研究所所刊, 11: 1–224
李朋, 胡正祥, 吴龙, 杜小锋, 宗维, 周峰, 毛启曦. 2017. 鄂西地区志留系纱帽组斑脱岩的发现及其锆石U-Pb年代学意义. 地质科技情报, 35: 1–9
李启剑, 王媛媛, 李越, 马俊业, 张园园, 邓小杰, 蔡习尧. 2012. 泥质对志留系礁滩生长的抑制作用: 黔北桐梓韩家店组的例证. 古生物学报, 51: 127–136
李志宏, 黄照先, 牛志军, 陈立德, 段万军, 张开明. 1999. 长江三峡地区特列奇其生物组合及其对比. 华南地质与矿产, 4: 57–62
李忠雄, 钱咏臻. 2001. 扬子地台西缘志留系牙形刺研究新进展. 沉积与特提斯地质, 21: 87–101
林宝玉. 1979. 中国的志留系. 地质学报, 3: 173–191
林宝玉, 等著. 1984. 中国的志留系·中国地层 6. 北京: 地质出版社. 1–245
林宝玉, 邱洪荣. 1983. 西藏的志留系. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集8, 地层·古生物. 北京: 地质出版社. 15–28
林宝玉, 苏养正, 朱秀芳, 戎嘉余. 1998. 中国地层典·志留系. 北京: 地质出版社. 1–104
林宝玉, 王乃文, 王思恩, 刘桂芳, 邱洪荣. 1989. 志留系. 见: 中国地质科学院, 主编. 喜马拉雅岩石圈构造演化·西藏地层. 中华人民共和国地质矿产部, 地质专报二地层古生物第11号. 北京: 地质出版社. 20–40
刘第墉, 陈旭, 张太荣. 1964. 四川北部南江早古生代地层. 中国科学院地质古生物研究所集刊, 1: 161–171
刘时藩. 1995. 塔里木西北的中华棘鱼化石及地质意义. 古脊椎动物学报, 33: 85–98
刘渭洲, 彭玉鲸, 王振中, 谢炬, 冯佐峰. 1982. 吉林伊通桃山早志留世笔石地层. 地层学杂志, 6: 209–217
罗华, 何仁亮, 潘龙克, 杨成, 余国飞. 2016. 湖北宣恩县麻阳寨晚奥陶-早志留世龙马溪组斑脱岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义. 资源环境与工程, 30: 547–550
马会珍, 王雪华. 2014. 黔东北志留纪晚期小溪组沉积环境研究. 地球科学进展, 29: 859–864
穆恩之. 1954. 论五峰页岩. 古生物学报, 2: 153–170
穆恩之. 1964 . 中国的志留系. 见: 全国地层委员会, 编. 全国地层会议学术报告汇编——中国的志留系. 北京: 科学出版社. 1–95
穆恩之, 陈旭, 倪寓南, 戎嘉余. 1982. 关于中国志留系划分对比问题(中国志留纪地层对比表及说明书). 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 中国地层表及其说明书. 北京: 科学出版社. 73–89
穆恩之, 陈旭, 倪寓南, 穆道成, 袁金良, 韦仁彦, 姚肇贵, 殷保安, 施文蛟, 张军达. 1988. 广西钦州、玉林地区的志留系和泥盆系. 地层学杂志, 12: 241–254
倪超, 李越, 于深洋, 毛颖颜. 2016. 黔东北石阡志留纪最早期生物礁的形态学和古生态学. 地质科学, 51: 978–989
倪寓南. 1997. 云南施甸志留纪霍梅晚期(Late Homerian)笔石. 古生物学报, 36: 310–320
倪寓南, 林尧坤. 2000. 云南施甸志留纪上人和桥组笔石. 古生物学报, 39: 343–355
倪寓南, 宋礼生. 2002. 西北地区志留纪温洛克世晚期-罗德洛世早期的一些笔石. 古生物学报, 41: 361–371
倪寓南, 陈挺恩, 蔡重阳, 李国华, 段彦学, 王举德. 1982. 云南西部的

志留系. 古生物学报, 21: 119–132
戎嘉余, 陈旭, 王成源, 耿良玉, 伍鸿基, 邓占球, 陈挺恩, 徐均涛. 1990. 论华南志留系对比的若干问题. 地层学杂志, 14: 161–177
戎嘉余, 王怿, 詹仁斌, 唐鹏, 黄冰, 吴荣昌, 王光旭, 李越, 邓小杰. 2012. 论桐梓上升——志留纪埃隆晚期黔中古陆北扩的证据. 地层学杂志, 36: 679–691
戎嘉余, 王怿, 张小乐. 2012. 追踪地质时期的浅海红层——以上扬子区志留系下红层为例. 中国科学: 地球科学, 42: 862–878
戎嘉余, 魏鑫, 詹仁斌, 王怿. 2018. 奥陶纪末期深水介壳动物群在湘西北的发现及其意义. 中国科学: 地球科学, 48: 753–766
戎嘉余, 张研, 陈秀琴. 1987. 西秦岭碌曲-迭部地区志留系-泥盆系界线地层的腕足类化石群. 见: 地质矿产部西安地质矿产研究所, 中国科学院南京地质古生物研究所, 编. 西秦岭碌曲、迭部地区晚志留世与泥盆纪地层古生物(下册). 南京: 南京大学出版社. 1–94
苏养正. 1981. 论图瓦贝(*Tuvaella*)的时空分布和生态环境. 古生物学报, 20: 567–576
唐鹏, 黄冰, 王成源, 徐洪河, 王怿. 2010. 四川广元志留系Ludlow统的再研究兼论车家坝组的含义. 地层学杂志, 34: 241–253
万正权, 金淳泰, 陈继荣, 钱泳蓁, 叶少华. 1991. 四川广元地区晚志留世地层的发现及其意义. 地层学杂志, 15: 53–55
汪啸风, 1965. 黔北早志留世晚期和中志留世笔石群的发现及其意义. 古生物学报, 13: 118–132
汪啸风. 1977. 最晚志留纪和早泥盆世单笔石类在广西钦州的发现及其意义. 地质学报, 2: 190–205
汪啸风, 1978. 广西钦州、防城一带晚志留世-早泥盆世笔石群的初步研究. 华南泥盆系会议论文集. 北京: 地质出版社. 280–291
汪啸风, 柴之芳. 1989. 奥陶系与志留系界线处生物绝灭事件及其与铱和碳同位素异常的关系. 地质学报, 3: 255–264
汪啸风, 陈孝红, 王传尚, 李志宏. 2004. 中国奥陶系和下志留统下部年代地层单位的划分. 地层学杂志, 28: 1–17
汪啸风, 倪世钊, 曾庆銮, 徐光洪, 周天梅, 李志宏, 项礼文, 赖才根. 1987. 长江三峡地区生物地层学(2): 早古生代分册. 北京: 地质出版社. 1–641
王成源. 1980. 云南曲靖上志留统牙形刺. 古生物学报, 19: 369–378
王成源. 1981. 云南曲靖玉龙寺组时代的新认识. 地层学杂志, 5: 195–196
王成源. 2013. 中国志留纪牙形刺. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1–230
王成源, 陈立德, 王怿, 唐鹏. 2010. *Pterospathodus eopennatus* (牙形刺)带的确认与志留系纱帽组的时代及相关地层的对比. 古生物学报, 49: 10–28
王成源, 王平, 杨光华, 谢伟. 2009. 四川盐边稗子田志留系牙形刺生物地层的再研究. 地层学杂志, 33: 302–317
王成源, 王志浩. 2016. 中国牙形刺生物地层. 杭州: 浙江大学出版社. 1–379
王传尚, 汪啸风, 陈孝红. 2005. 志留系. 见: 汪啸风, 陈孝红等, 主编. 中国各地质时代地层划分与对比. 北京: 地质出版社. 155–194
王念忠, 张师本, 王俊卿, 朱敏. 1998. 新疆巴楚早志留世软骨鱼类微体化石. 古脊椎动物学报, 36: 257–267
王平. 2005. 内蒙古达茂旗巴特敖包地区的西别河组剖面与西别河组. 吉林大学学报(地球科学版), 35: 409–415
王朴, 胡继忠, 宋衫林, 杨笑春. 1988. 新疆柯坪Sinocanthus的发现及其地层意义. 新疆地质, 6: 47–50
王怿, 戎嘉余, 唐鹏, 王光旭, 张小乐. 2016. 四川盐边稗子田剖面志留系新认识. 地层学杂志, 40: 225–233
王怿, 戎嘉余, 唐鹏, 吴荣昌. 2013a. 志留纪早期上扬子海域南部桐梓上升的新证据. 地层学杂志, 37: 129–138
王怿, 戎嘉余, 詹仁斌, 黄冰, 吴荣昌, 王光旭. 2013b. 鄂西南奥陶系-志留系交界地层研究兼论宜昌上升. 地层学杂志, 37: 264–274
王怿, 戎嘉余, 徐洪河, 王成源, 王根贤. 2010. 湖南张家界地区志留纪晚期地层新见兼论小溪组的时代. 地层学杂志, 34: 113–126
王怿, 张小乐, 徐洪河, 蒋青, 唐鹏. 2011. 重庆秀山志留系小溪组的发现与迴星哨组的厘定. 地层学杂志, 35: 113–121
王怿, 唐鹏, 张小乐, 刘建波, 张雨晨, 燕夔, 王光旭, 黄冰, 詹仁斌. 2017. 四川广元志留纪晚期车家坝组中线形植物的发现及其意义. 地层学杂志, 41: 379–358
王怿, 唐鹏, 张小乐, 张雨晨, 黄冰, 戎嘉余. 2018. 志留纪晚期小溪组在湖北宜昌纱帽山的发现. 地层学杂志, 42: 371–380
谢家荣, 赵亚曾. 1925a. 湖北西部罗惹坪志留系之研究. 中国地质学会志, 4: 39–44
谢家荣, 赵亚曾. 1925b. 湖北宜昌兴山秭归巴东等县地质矿产. 中国地质学会志, 7: 13–76
谢尚克, 汪正江, 王剑, 卓皆文. 2012. 湖南桃源赫坪奥陶系五峰组顶部斑脱岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄. 沉积与特提斯地质, 32: 65–69
闫冠州, 吴荣昌, 王怿, 唐鹏. 2018. 湖北恩施志留系秀山组顶部的牙形刺及其地层意义. 微体古生物学报, 35: 157–169
张金亮, 张鑫. 2006. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征. 中国海洋大学学报, 36: 200–208
张师本, 王成源. 1995. 从牙形刺动物群论依木干他乌组的时代. 地层学杂志, 19: 133–135
张廷山, 陈晓慧, 边立曾, 俞剑华, 蓝光志, 万云. 1996. 大地构造对上扬子区志留纪生物礁分布及发育控制. 沉积学报, 14: 84–93
张廷山, 蓝光志, Kershaw S. 1999. 构造及海面波动对四川盆地志留纪生物礁的控制. 石油学报, 20: 19–24
张廷山, 俞剑华, 边立曾, Kershaw S, 陈晓慧, 蓝光志, 万云. 1998. 四川盆地南北缘志留系的锶和碳、氧同位素演化及其地质意义. 岩相古地理, 18: 41–49
张元动, Lenz A C. 2001. 云南南部及其邻区志留系对比. 地层学杂志, 25: 1–7
赵文金, 王士涛, 王俊卿, 朱敏. 2009. 新疆柯坪-巴楚地区志留纪含鱼

化石地层序列与加里东运动. 地层学杂志, 33: 225–240
赵文金, 朱敏, 刘升, 潘照晖, 贾连涛. 2016. 湖南澧县山门水库周边志留纪含鱼地层新知. 地层学杂志, 40: 349–358
赵文金, 朱敏. 2014. 中国志留纪鱼化石及含鱼地层对比研究综述. 地学前缘, 21: 185–202
周志毅, 袁文伟, 韩乃仁, 周志强. 2004. 扬子陆块奥陶纪末期-志留纪早期三叶虫的灭绝和复苏. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏——来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 127–152, 1042
朱敏, 刘玉海, 贾连涛, 盖志锟. 2012. 云南曲靖志留纪罗德洛世真盔甲鱼类一新属. 古脊椎动物学报, 50: 1–7
邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一). 石油勘探与开发, 42: 689–701
Berry W B N. 1987. The Ordovician-Silurian boundary: New data, new concerns. Lethaia, 20: 209–216
Botting J P, Muir L A, Zhang Y D, Ma X, Ma J Y, Wang L W, Zhang J F, Song Y Y, Fang X. 2017. Flourishing sponge-based ecosystems after the end-Ordovician mass extinction. Curr Biol, 27: 556–562
Boucot A J, Johnson J G. 1973. Silurian Brachiopods. In: Hallam A, ed. Atlas of Palaeobiogeography. Amsterdam: Elsevier. 59–65
Boucot A J. 1975. Evolution and Extinction Rate Controls. Amsterdam: Elsevier. 1–427
Brett C E, McLaughlin P I, Histon K, Schindler E, Ferretti A. 2012. Time-specific aspects of facies: State of the art, examples, and possible causes. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 367-368: 6–18
Calner M. 2008. Silurian global events—At the tipping point of climate change. In: Elewa A M T, ed. Mass Extinction. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 21–57
Cocks L R M. 1985. The Ordovician-Silurian boundary. Episodes, 8: 98–100
Cocks L R M, Torsvik T H. 2013. The dynamic evolution of the Palaeozoic geography of eastern Asia. Earth-Sci Rev, 117: 40–79
Corradini C, Corriga M G. 2012. A Přídolí–Lochkovian conodont zonation in Sardinia and the Carnic Alps: Implications for a global zonation scheme. Bull Geosci, 87: 635–650
Corradini C, Corriga M G, Männik P, Schönlaub H P. 2015. Revised conodont stratigraphy of the Cellon section (Silurian, Carnic Alps). Lethaia, 48: 56–71
Cramer B D, Brett C E, Melchin M J, Männik P, Kleffner M A, Mclaughlin P I, Loydell D K, Munnecke A, Jeppsson L, Corradini C, Brunton F R, Saltzman M R. 2011. Revised correlation of Silurian Provincial Series of North America with global and regional chronostratigraphic units and $\delta^{13}C_{carb}$ chemostratigraphy. Lethaia, 44: 185–202
Cramer B D, Condon D J, Soderlund U, Marshall C, Worton G J, Thomas A T, Calner M, Ray D C, Perrier V, Boomer I, Patchett P J, Jeppsson L. 2012. U-Pb (zircon) age constraints on the timing and duration of Wenlock (Silurian) paleocommunity collapse and recovery during the “Big Crisis”. Geol Soc Am Bull, 124: 1841–1857
Cramer B D, Kleffner M A, Saltzman M R. 2006. The Late Wenlock Mulde positive carbon isotope ($\delta^{13}C_{carb}$) excursion in North America. GFF, 128: 85–90
Cramer B D, Schmitz M D, Huff W D, Bergström S M. 2015. High-precision U-Pb zircon age constraints on the duration of rapid biogeochemical events during the Ludlow Epoch (Silurian Period). J Geol Soc, 172: 157–160
Díaz-Martínez E, Grahn Y. 2007. Early Silurian glaciation along the western margin of Gondwana (Peru, Bolivia and northern Argentina): Palaeogeographic and geodynamic setting. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 245: 62–81
Edwards D. 1982. Fragmentary non-vascular plant microfossils from the late Silurian of Wales. Botanical J Linnean Soc, 84: 223–256
Fan J, Peng P, Melchin M J. 2009. Carbon isotopes and event stratigraphy near the Ordovician-Silurian boundary, Yichang, South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 276: 160–169
Foster G L, Royer D L, Lunt D J. 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. Nat Commun, 8: 14845
Grabau A W. 1924. Stratigraphy of China, Part 1. Palaeozoic and older. Peking: Geological Survey of China. 1–528
Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. Science, 322: 64–68
Holland C H, Bassett M G. 1989. A global Standard for the Silrian System. Nat Mus Wales Geol Ser, 10: 325
Holland C H, Bassett M G, eds. 2002. Telychian rocks of the British Isles and China (Silurian, Llandovery Series): An experiment to test precision in Stratigraphy. Nat Mus Wales Geol Ser, 21: 1–210
Holland C H, Bassett M G, Rickards R B. 2003. Stability in stratigraphy. Lethaia, 36: 69–70
Holland C H. 1985. Series and stages of the Silurian System. Episodes, 8: 101–103
Joachimski M M, Breisig S, Buggisch W, Talent J A, Mawson R, Gereke M, Morrow J R, Day J, Weddige K. 2009. Devonian climate and reef evolution: Insights from oxygen isotopes in apatite. Earth Planet Sci Lett, 284: 599–609
Kiipli E. 2004. Redox changes in the deep shelf of the East Baltic Basin in the Aeronian and early Telychian (early Silurian). Proc Estonia Acad Sci, Geol, 53: 94–124

Kunk M J, Sutter J, Obradovitch J D, Lanpher M A. 1985. Age of biostratigraphic horizons within the Ordovician and Silurian Systems. In: Snelling N J. ed. The Chronology of the Geological Record. Geol Soc Mem, 10: 89–92

Lawson J D, White D E. 1989. The Ludlow Series in the type area. In Holland C H, Bassett M G, eds. A Global Standard for the Silurian System. Nat Mus Wales Geol Ser, 9: 73–90

Lee J S, Chao Y T. 1924. Geology of the Gorge District of the Yangtze (from Ichang to Tzekuei) with special reference to the development of the gorges. Bull Geol Soc China, 3: 351–392

Lespérence P J, Barnes C R, Berry W B N, Boucot A J, Mu E Z. 1987. The Ordovician-Silurian boundary stratotype: Consequences of its approval by the IUGS. Lethaia, 20: 217–222

Li J J, Qian Y Y, Zhang J M. 1984. Ordovician-Silurian boundary section from Jingxian, South Anhui. In: Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, ed. Stratigraphy and Palaeontology of Systemic Boundaries in China, Ordovician-Silurian Boundary (1). Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House. 287–308

Li L, Feng H, Janussen D, Reitner J. 2015. Unusual Deep Water sponge assemblage in South China—Witness of the end-Ordovician mass extinction. Sci Rep, 5: 16060

Li Y, Kershaw S, Xu C. 2002. Biotic structure and morphology of patch reefs from South China (Ningqiang Formation, Telychian, Llandovery, Silurian). Facies, 46: 133–148

Li Y, Kershaw S. 2003. Reef reconstruction after extinction events of the latest ordovician in the Yangtze platform, South China. Facies, 48: 269–284

Li Y, Wang G, Kershaw S, Yu S, Ni C. 2017. Lower Silurian stromatolites in shallow-marine environments of the South China Block (Guizhou Province, China) and their palaeoenvironmental significance. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 474: 89–97

Liu J, Wang Y, Zhang X, Rong J, Jin J. 2016. Early Telychian (Silurian) marine siliciclastic red beds in the Eastern Yangtze Platform, South China: Distribution pattern and controlling factors. Can J Earth Sci, 53: 712–718

Loydell D K. 2008. The base of Wenlock Series. Silurian Times, 15: 10–12

Loydell D K. 2011. The GSSP for the base of the Wenlock Series, Hughley Brook. In: Ray D C, ed. Silurian Revisited, a Field Guide. International Subcommission on Silurian Stratigraphy Field Meeting. 91–99

Loydell D K. 2012. Graptolite biozone correlation charts. Geol Mag, 149: 124–132

Loydell D K, Männik P, Nestor V. 2003. Integrated biostratigraphy of the lower Silurian of the Aizpute-41 core, Latvia. Geol Mag, 140: 205–229

McLaughlin P I, Emsbo P, Brett C E. 2012. Beyond black shales: The sedimentary and stable isotope records of oceanic anoxic events in a dominantly oxic basin (Silurian Appalachian Basin, USA). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 367-368: 153–178

Melchin M J, Jiayu R, Gradstein F, Koren T N, Finney S C. 2004. Stability in stratigraphy. Lethaia, 37: 124–125

Melchin M J, Sadler P M, Cramer B D. 2012. The Silurian period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, Ogg G, eds. The Geological Time Scale. Amsterdam: Elsevier. 525–558

Melchin M J, Williams S H. 2000. A restudy of the akidograptine graptolites from Dob's Linn and a proposed redefined zonation of the Silurian stratotype. Palaeontology Down Under 2000, Geol Soc Austr, Abstracts. 61–63

Melchin M J. 2005. Restudying a global stratotype for the base of the Silurian: A report the members of the Subcommission on Silurian Stratigraphy. Silurian Times, 12: 12–13

Mu A T. 1948. Silurian succession and graptolite fauna of Lientan. Bull Geol Soc Chin, 28: 207–231

Mu E Z, Boucot A J, Chen X, Rong J Y. 1986. Correlation of the Silurian Rocks of China. Geol Soc Am Spec Paper, 202: 1–80

Mu E Z, Chen X, Rong J Y. 1989. The Llandovery Series in China. In: Holland C H, Bassett M G, eds. A Global Standard for the Silurian System. Nat Mus Wales, Geol Ser, 9: 183–200

Mullins G L, Aldridge R J. 2004. Chitinozoan biostratigraphy of the basal Wenlock Series (Silurian) Global Stratotype Section and Point. Palaeontology, 47: 745–773

Mullins G L, Loydell D K. 2001. Integrated Silurian chitinozoan and graptolite biostratigraphy of the Banwy River Section, Wales. Palaeontology, 44: 731–781

Ni Y, Lenz A C, Chen X. 1998. Pridoli graptolites from northern Xinjiang, Northwest China. Can J Earth Sci, 35: 1123–1133

Ogg J G, Ogg G M, Gradstein F M. 2016. A concise Geologic Time Scale. Amsterdam: Elsevier. 1–234

Rickards R B. 1976. The sequence of Silurian graptolite zones in the British Isles. Geol J, 11: 153–188

Rong J Y, Boucot A J, Su Y Z, Strusz D L. 1995. Biogeographical analysis of Late Silurian brachiopod faunas, chiefly from Asia and Australia. Lethaia, 28: 39–60

Rong J Y, Chen X, Su Y Z, Ni Y N, Zhan R B, Chen T E, Fu L P, Li R Y, Fan J X. 2003. Silurian paleogeography of China. In: Landing E, Johnson M E, eds. Silurian Lands and Seas—Paleogeography Outside of Laurentia. NY State Mus Bull, 493: 243–298

Rong J Y, Chen X. 2003. Silurian biostratigraphy of China. In: Zhang W T, Chen P J, Palmer A R, eds. Biostratigraphy of China. Beijing: Science Press. 173–236

Rong J Y, Huang B, Zhan R B, Harper D A T. 2013. Latest Ordovician

and earliest Silurian brachiopods succeeding the Hirnantia Fauna in Southeast China. Spec Papers Palaeontol, 90: 1–142

Rong J Y, Melchin M J, Williams S H, Koren T N, Verniers J. 2008. Report of the restudy of the defined global stratotype of the base of the Silurian System. Episodes, 31: 315–318

Rong J Y, Strusz D L, Boucot A J, Fu L P, Modzalevskaya T L, Su Y Z. 1994. The Retziellidae (Silurian ribbed impunctate athyrididine brachiopods). Acta Palaeontol Sin, 33: 545–574

Rong J Y, Wang Y, Zhang X L. 2012. Tracking shallow marine red beds through geological time as exemplified by the lower Telychian (Silurian) in the Upper Yangtze Region, South China. Sci China Earth Sci, 55: 699–713

Rong J Y, Zhang Z X. 1982. A southward extension of the Silurian *Tuvaella* brachiopod fauna. Lethaia, 15: 133–147

Ross R J J. 1975. Early Paleozoic trilobites, sedimentary facies, lithospheric plates, and ocean currents. Fossils Strata, 4: 307–329

Sadler P M, Cooper R A, Melchin M. 2009. High-resolution, early Paleozoic (Ordovician-Silurian) time scales. Geol Soc Am Bull, 121: 887–906

Sansom I J, Wang N Z, Smith M. 2005. The histology and affinities of sinacanthid fishes: Primitive gnathostomes from the Silurian of China. Zoological J Linnean Soc, 144: 379–386

Štorch P, 1994. Graptolite biostratigraphy of the Lower Siklurian (Llandovery and Wenlock) of Bohemia. Geol J, 29: 137–165

Štorch P, Kraft P. 2009. Graptolite assemblages and stratigraphy of the lower Silurian Mrákotín Formation, Hlinsko Zone, NE interior of the Bohemian Massif (Czech Republic). Bull Geosci, 84: 51–74

Štorch P, Massa D. 2007. Middle Telychian (upper Llandovery, Silurian) graptolites from boreholes of northwestern Libya: Their biostratigraphic significance and palaeogeographical implication. Geobios, 40: 535–540

Sun Y C. 1943. Bases of the chronological classification with special reference to the Palaeozoic stratigraphy of China. Bull Geol Soc Chin, 23: 35–56

Tang P, Wang J, Wang C Y, Wu R C, Yan K, Liang Y, Wang X. 2015. Microfossils across the Llandovery-Wenlock boundary in Ziyang–Langao region, Shaanxi, NW China. Palaeoworld, 24: 221–230

Ting V K, Wang Y L. 1937. Cambrian and Silurian formations of Malung and Chütsing districts, Yunnan. Bull Geol Soc China, 16: 1–28

Tong-Dzuy T, Boucot A J, Rong J Y, Fang Z J. 2001. Late silurian marine shelly fauna of Central and Northern Vietnam. Geobios, 34: 315–338

Torsvik T H, Cocks L R M. 2017. Earth History and Palaeogeography. Cambridge: Cambridge University Press. 1–317

Wang C, Li N, Sun Y, Zong P. 2011. Distribution of *Tuvaella* brachiopod fauna and its tectonic significance. J Earth Sci, 22: 11–19

Wang G, Zhan R, Huang B, Percival I G. 2017. Coral faunal turnover through the Ordovician-Silurian transition in South China and its global implications for carbonate stratigraphy and macroevolution. Geol Mag, 154: 829–836

Wang G, Li Y, Kershaw S, Deng X. 2014. Global reef recovery after the end-Ordovician extinction: Evidence from late Aeronian coral–stromatoporoid reefs in South China. GFF, 136: 286–289

Wang J, Štorch P, Wang X, Zhang J, Meng Y, Fu L P, Li R S. 2013. Preliminary study of upper Landovery and lower Wenlock graptolite fauna of Ziyang and Langao sections, Shaanxi Province, China. In: Lindskog A, Mehlqvist K, eds. Proceedings of the 3rd IGCP 591 Annual Meeting. Lund. 332–334

Wang Y, Zhang Y D. 2010. Llandovery sporomorphs and graptolites from the Manbo Formation, the Mojiang County, Yunnan, China. Proc R Soc B-Biol Sci, 277: 267–275

Wang Y, Zhu H C, Li J. 2005. Late Silurian plant microfossil assemblage from Guangyuan, Sichuan, China. Rev Palaeobot Palynol, 133: 153–168

Wei X, Zhan R B. 2017. A late Rhuddanian (early Llandovery, Silurian) trilobite association from South China and its implications. Palaeoworld, 27: 42–52

Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. Earth-Sci Rev, 113: 303–341

Williams S H. 1988. Dob's Linn—The Ordovician-Silurian boundary stratotype. In: Cocks L R M, Rickards R B, eds. A Global Analysis of the Ordovician-Silurian Boundary. Bull Br Mus Nat Hist (Geol), 43: 17–30

Xiao W J, Han C, Yuan C, Sun M, Lin S, Chen H, Li Z, Li J, Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. J Asian Earth Sci, 32: 102–117

Xiao W J, Huang B, Han C, Sun S, Li J. 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens. Gondwana Res, 18: 253–273

Xiao W J, Windley B F, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu C, Li J. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. J Asian Earth Sci, 35: 323–333

Yin T H. 1949. Tentative classification and correlation of Silurian rocks of South China. Bull Geol Soc Chin, 29, 1–61

Yin T H. 1966. China in the Silurian period. J Geol Soc Austral, 13: 277–297

Zalasiewicz J A, Taylor L, Rushton A W A, Loydell D K, Rickards R B, Williams M. 2009. Graptolites in British stratigraphy. Geol Mag,

146: 785–850
Zhan R B, Jin J S. 2007. Ordovician-Early Silurian (Llandovery) stratigraphy and palaeontology of the Upper Yangtze Platform, South China. Beijing: Science Press. 1–169
Zhang X L, Wang Y, Rong J Y, Li R Y. 2014. Pigmentation of the Early Silurian shallow marine red beds in South China as exemplified by the Rongxi Formation of Xiushan, southeastern Chongqing, central China. Palaeoworld, 23: 240–251
Zhang Y D, Fan J X, Wang Y, Song Y Y, Cheng J F. 2013. A mid Telychian (Llandovery) graptolite fauna from Mojiang, Yunnan Province, southwestern China. Mem Ass Austral Palaeontols, 44: 123–142
Zhang Y D, Lenz A C. 1997. Uppermost Wenlock and Ludlow graptolites from southern Yunnan, China. Can J Earth Sci, 34: 1220–1238
Zhang Y D, Wang Y, Zhan R B, Fan J X, Zhou Z Q, Fang X. 2014. Ordovician and Silurian stratigraphy and palaeontology of Yunnan, Southwest China. A Guide to the Field Excursion Across the South China, Indochina and Sibumasu. Beijing: Science Press. 1–138
Zhao W J, Herten U, Zhu M, Mann U, Lücke A. 2010. Carbon isotope stratigraphy across the Silurian-Devonian transition in Zoige (West Qinling), China. Boll Soc Paleontol Ital, 49: 35–-45
Zhao W J, Wang N Z, Zhu M, Mann U, Herten U, Lücke A. 2011. Geochemical stratigraphy and microvertebrate assemblage sequences across the Silurian/Devonian transition in South China. Acta Geol Sin, 85: 340–353
Zhao W J, Zhu M. 2015. A review of Silurian fishes from Yunnan, China and related biostratigraphy. Palaeoworld, 24: 243–250
Zhou Z Y, Dean W T. 2006. Phanerozoic Geology of Northwest China. Beijing: Science Press. 1–316
Zhou Z Y, Zhen Y Y. 2008. Trilobite Record of China. Beijing: Science Press. 1–402
Zhu M, Ahlberg P E, Pan Z, Zhu Y, Qiao T, Zhao W, Jia L, Lu J. 2016. A Silurian maxillate placoderm illuminates jaw evolution. Science, 354: 334–336
Zhu M, Yu X B, Ahlberg P E, Choo B, Lu J, Qiao T, Qu Q, Zhao W J, Jia L, Blom H, Zhu Y. 2013. A Silurian placoderm with osteichthyan-like marginal jaw bones. Nature, 502: 188–193
Ziegler A M, McKerrow W S. 1975. Silurian marine red beds. Am J Sci, 275: 31–56

(责任编委: 沈树忠)